

HANDBUCH DER ASTROPHYSIK

HERAUSGEGEBEN VON
G EBERHARD A KOHLSCHUTTER
H LUDENDORFF

BAND I
GRUNDLAGEN
DER ASTROPHYSIK
ERSTER TEIL



BERLIN
VERLAG VON JULIUS SPRINGER
1933

GRUNDLAGEN DER ASTROPHYSIK

ERSTER TEIL

BEARBEITET VON

W E. BERNHEIMER · G EBERHARD
ALBERT KÖNIG · ARTHUR KÖNIG · K. W MEISSNER
C RUNGE † · H SCHULZ

MIT 299 ABBILDUNGEN



BERLIN
VERLAG VON JULIUS SPRINGER
1933

IIA Lib.



ALLE RECHTE, INSBESONDERE DAS DER ÜBERSETZUNG
IN FREMDE SPRACHEN, VORBEHALTEN
COPYRIGHT 1933 BY JULIUS SPRINGER IN BERLIN
PRINTED IN GERMANY

Inhaltsverzeichnis.

Kapitel 1

Grundlagen der theoretischen Optik

Von Professor Dr H SCHULZ, Berlin

(Mit 50 Abbildungen)

	Seite
a) Polarisation	
1 Grundlagen	1
2 Reflexion und Brechung	1
3 Elliptisch polarisiertes Licht	2
4 Natürliche Doppelbrechung	5
5 Doppelbrechung in isotropen Medien durch mechanische und thermische Einflüsse	8
6 Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit	13
7 Polarisation bei Phosphoreszenz und Fluoreszenz	17
8 Zerstreuung des Lichtes an kleinen Körpern	18
9 Erkennung und Messung der Schwingungsrichtung und des Polarisationsgrades	18
10 Photometrische Anordnungen	21
b) Interferenz	25
11 Grundlagen	27
12 Interferenzen bei punktförmiger Lichtquelle	27
13 Interferenzen dünner Blättchen	28
14 MICHELSONSches Interferometer	31
15 Interferenzspektroskop nach LUMMLER-GHRCKL	35
16 PEROT-FABRYSche Platte	39
17 Interferenzen durch mehrere Platten Prüfung optischer Systeme	40
c) Beugung	44
18 Allgemeine Grundlagen	47
19 Wirkung mehrerer beugender Öffnungen	47
20 Beugungserscheinungen bei Abbildung durch Kugelwellen	52
d) DOPPLER-Effekt	57
21 Ableitung der allgemeinen Beziehungen	59
22 Experimentelle Beweise	59
e) ZEEMAN-Effekt und STARK-Effekt	62
23 ZEEMAN-Effekt Grundlagen	63
24 Zerlegungstypen	63
25 PASCHEN-BACK-Effekt	67
26 ZEEMAN-Effekt an Bandenspektren	73
27 ZEEMAN-Effekt in den Spektren der Sonnenflecke	74
28 STARK-Effekt Allgemeines	75
29 Der STARK-Effekt bei den Spektren der Elemente	76
	79

Kapitel 2

Das Fernrohr

Von Dr ALBERT KONIG, Jena

(Mit 138 Abbildungen)

a) Die Lehre von der Abbildung durch Strahlen	
1 Das Brechungsgesetz	82
2 Das brechende Prisma und die Planplatte	82
	83

3. Die Abbildung durch ebene Spiegel	Seite
4 Die Abbildung durch eine brechende Ebene	84
5 Spiegelprismen	85
6 Einleitendes über die Abbildung durch Umdrehungsflächen	87
7 Der Begriff des Bildpunkts	88
8 Der Satz von HELMHOLTZ	89
9 Die Grundgleichungen der Abbildung	90
10 Sonderfälle von abbildenden Systemen	92
11 Das teleskopische System	95
12 SEIDELs Theorie der Bildfehler	97
13 Die Verzeichnung	98
14 Bildkrümmung und Astigmatismus	99
15 Die Koma	100
16 Die sphärische Abweichung	101
17 Zonenfehler	104
18 Die PETZVALsche Bedingung	105
19 Das Wesen der Farbenabweichung	105
20 Die Berechnung der Farbenabweichung erster Ordnung	107
21 Das sekundäre Spektrum	108
22 Die Arten der Farbenkorrektur	110
23 Die Änderung der Bildfehler mit der Farbe	112
24 Die Öffnungsblende	114
25 Die Abbildungstiefe	114
b) Das Bild als Beugungserscheinung	115
26 Das Beugungsbild eines Lichtpunktes	116
27 Das Auflösungsvermögen	116
28 Der Einfluß von Abdeckung und Absorption in der Öffnung	118
29 Die Abbildung von Randern	121
30 Die Farbenabweichung	122
31 Die sphärische Abweichung	123
32 Koma, Astigmatismus und anderes	124
c) Der Bau des Fernrohrs	126
33 Die Vergrößerung des Fernrohrs	128
34 Die Helligkeit des Fernrohrs	128
35 Das Auflösungsvermögen	129
36 Die Einteilung der Fernrohre	132
37 Zur Geschichte des Fernrohrs	133
38 Der Strahlengang beim astronomischen Fernrohr	134
39 Das Objektiv für Beobachtung	135
40 Das photographische Objektiv	136
41 Spektrographenobjektive	140
42 Über Glasbeschaffenheit	143
43 Absorption, Temperaturänderung und Zentrierung von Objektiven	145
44 Große Refraktoren	148
45 Die astronomischen Okulare	149
46 Das Sonnenokular	151
47 Das Fernrohr für Meßzwecke	153
48 Das Erdfernrohr	154
49 Das Prismenfernrohr	157
50 Das holländische Fernrohr	158
51 Die dünne Sammellinse mit fernrohrähnlicher Wirkung	159
52 Das Doppelfernrohr	160
53 Der Hohlspiegel als Objektiv	161
54 Formänderungen durch Schwere und Wärme	163
55 Doppelspiegel mit größerem Gesichtsfeld	166
56 Die Spiegelfernrohre	170
57 Die katadioptrischen Spiegelfernrohre	171
58 Die Medialfernrohre	175
59 Die Verbindung des Fernrohrs mit Planspiegeln zur Vereinfachung der Montierung	176
60 Die großen Spiegelfernrohre	177
d) Die Prüfung des Fernrohrs	181
61 Einleitung	184
62 Die Prüfung ohne besondere Hilfsmittel	184
	185

Inhaltsverzeichnis

VII

	Seite
63 Die Prüfung des Beugungsscheibchens	187
64. TWYMANS Interferometer	187
65 WAETZMANN'S Verfahren	189
66 RONCHIS Verfahren	191
67. HARTMANN'S Verfahren	192
68 Das Doppelspaltverfahren	194
69 WETTHAUERS Verfahren	197
70 Das Messerschneidenverfahren	199
71. Die Verfahren von YVON und STREHL	201
72 Die technische Konstante des Objektivs	201
73 Andere Bildfehler für eine Farbe	202
74 Die Farbenabweichung	203
75 Das photographische Objektiv	204
76 Der Spiegel	204
77 Die Bestimmung des Brennpunkts	206
78. Die Messung der Brennweite	207
79 Die optische Messung von Radien	210
80 Die Messung der optischen Leistung	211

Kapitel 3

Spektroskopie

Von Professor Dr. C. RUNGE †, Göttingen

Ergänzt von Professor Dr K W MEISSNER, Frankfurt a M

(Mit 24 Abbildungen)

a) Theorie der Lichtbrechung durch Prismen	214
1 Zerlegung des Lichtes	214
2. Die Brechung des Lichtes	214
3 Das Brechungsdreieck	215
4 Brechung durch ein Prisma	215
5 Veränderung der Ablenkung mit der Lage des Prismas zum einfallenden Strahl	215
6 Das Minimum der Ablenkung	216
7 Zweite graphische Konstruktion der Ablenkung durch ein Prisma	216
8 Allgemeine Berechnung des Brechungsindex	217
9 Ablenkung durch zwei Prismen	218
10 Das geradsichtige Prisma	218
11 Schräger Durchgang durch ein Prisma	218
12 Krümmung der Linien eines Prismenspektrums	220
13 Minimum der Gesamtablenkung eines Strahles durch einen Prismensatz	222
14 Astigmatismus	224
15 Winkeländerung der Strahlen infolge der Brechung	226
16 Astigmatismus bei mehreren Brechungen	226
17 Gesichtswinkel eines durch Prismen betrachteten Spaltes	229
18 Zusammenhang von Querschnitt und Richtungsunterschied eines Strahlenbündels bei Brechungen	229
19 Vermeidung des Astigmatismus bei Brechung an ebenen Flächen	230
20 Die Farbenzerstreuung	230
21 Zusammenhang der Farbenzerstreuung mit der Dispersion eines Mediums	231
22 Minimum der Farbenzerstreuung	232
23 Farbenzerstreuung bei mehreren Brechungen	233
24 Die Krümmung der Spektrallinien im Prismenspektrum bei Anwendung mehrerer Prismen	234
b) Theorie der Gitter und Interferenzspektroskope	235
25 Interferenz von Lichtbündeln gleicher Phasendifferenz	235
26 Die Kurve des Spektrums	236
27 Spektrallinien	236
28 Feinheit der Aufspaltung	237
29 Das ebene Gitter	237
30 Formel für die Interferenz der n Lichtbündel	239
31 Die auflösende Kraft des Gitters	240
32 Einfluß der Furchenform	241

33	Koinzidenzen von Linien verschiedener Wellenlänge	Seite 241
34	Das Konkavgitter	241
35	Die Lage des Spektrums beim Konkavgitter	242
36	Der ROWLANDSche Kreis	243
37	Abweichungen vom ROWLANDSchen Kreise	245
38	Astigmatismus	246
39	Fälle stigmatischer Abbildung	247
40	Stigmatisches Spektrum durch astigmatische Spaltbeleuchtung	248
41	Einfluß einer Dispersion des Mediums auf die Koinzidenz verschiedener Ordnungen	249
42	Die Aberration beim Konkavgitter	249
43	Auflösungsvermögen des Prismas im Vergleich zum Gitter	251
44	Geister	253
45	Apparate mit großem Gangunterschied aufeinanderfolgender Strahlenbündel	257
46	Das Stufengitter, Echelon	257
47	Prinzip der Interferenzspektroskope von LUMMER und von FABRY und PEROT	259
48	Die LUMMER-Platte	259
49	Der Apparat von PEROT und FABRY	260
50	Koinzidenzmethode	264
51	Phasensprung bei der Reflexion	268
52	Einfluß der Luftdispersion	269
53	Interferenzen im kontinuierlichen Spektrum FRAUNHOFERSche Linien	271
c)	Wellenlangensysteme	273
54	Zur Geschichte der Wellenlangenbestimmungen	273
55	Das ROWLANDSche Wellenlangensystem	275
56	MICHELSONS Messungen mit dem Interferometer	276
57	Druckverschiebung der Spektrallinien	277
58	Plan eines neuen Wellenlangensystems	278
59	Internationale ÅNGSTRÖM-Einheit, Normallinien zweiter Ordnung	278
60	Poleffekt	279
61	Die Arbeiten der Commission des etalons de longueur d'onde et des tables de spectres solaires	280
62	Vergleiche des Meters mit der Standardlinie	283
63	Normallinien zweiter Ordnung	283
64	Die sekundären Normalen des Eisenbogenspektrums	284
65	Sekundäre Normallinien des Neon- und Kryptonspektrums	284
66	Normallinien im Sonnenspektrum	287
67	Normalen zweiter Ordnung für das kurz- und das langwellige Gebiet	291
68	Normalen dritter Ordnung oder tertiäre Normalen	292
69	Gesetzmäßigkeiten der Spektren und ihre Anwendung auf die Prüfung eines Normalien-systems	292
70	Umrechnung von Wellenlängen aus dem ROWLANDSchen in das Internationale System	294
d)	Literaturverzeichnis	295

Kapitel 4

Sternspektrographie und Bestimmung von Radialgeschwindigkeiten

Von Professor Dr G EBERHARD, Potsdam

(Mit 27 Abbildungen)

a)	Allgemeine Prinzipien für die Konstruktion eines Sternspektrographen	299
1	Mechanische Stabilität des Spektrographen	299
2	Thermische Stabilität des Spektrographen	300
3	Die Optik des Spektrographen	300
4	Das Fernrohr	302
5	Das Teleskop und der Spektrograph des Astrophysikalischen Observatoriums in Victoria, B C	304
b)	Der mechanische Aufbau des Spektrographen	306
6	Einleitung	306
7	Konstruktion von W H WRIGHT	307
8	Konstruktion des Einprismenspektrographen von J S PLASKETT	311

	Seite
9 Gitterspektrograph von P W MERRILL und E C NICHOLS	315
10 Anordnung der Beobachtungen zu möglicher Vermeidung der Biegung	315
c) Spektrographenobjektive	316
11 Spektrographenobjektive	316
d) Die Spaltblende	318
12 Allgemeines	318
13 Die Spaltblende von J HARTMANN	319
14 Die Spaltblende von W H WRIGHT	319
15 Die Spaltblende von J S PLASKETT	321
16 Wann und wie oft soll das Vergleichsspektrum aufkopiert werden?	322
17 Spaltweite und Expositionszeit	323
18 Spaltweite und Reinheit des Spektrums	324
e) Hilfsapparate für den Spektrographen	326
19 Der Thermostat und Temperaturregler	326
20 Der Thermostat von J HARTMANN	327
21 Der Thermostat von J S PLASKETT	330
22 Literaturangaben über Thermostaten und Temperaturregler	331
23 Die Einrichtung zum Einstellen und Halten des Sternes auf dem Spalt	All-
gemeines	331
24 Ältere Verfahren	332
25 Verfahren von HUGGINS	332
f) Die Optik einiger besonders bekannter Spektrographen	334
26 Die Optik des zweiten MILLS-Spektrographen	334
27 Die Optik des Victoria-Spektrographen	334
28 Die Optik des Einprismenspektrographen der Sternwarte Berlin-Babelsberg	335
29 Literaturangaben über Beschreibungen von Spektrographen	335
g) Systematische Fehler bei der Aufnahme von Spektren	336
30 Optische Mängel des Spektrographen	336
31 Falscher Fokus	338
32 Temperaturänderungen während der Aufnahme	339
33 Biegung	340
34 Systematische Fehler infolge der Biegung des Feinrohrs selbst	342
35 Einstell- und Haltefehler	344
36 Einstell- und Haltefehler infolge der atmosphärischen Dispersion	346
37 Verzerrungen der Schicht der photographischen Platte	349
h) Systematische Fehler bei der Ausmessung der Spektrogramme	349
38 Fehler des Meßapparates	349
39 Die Linienkrümmung	349
40 Die Einstellungsfehler	352
i) Verwandlung der Messungen (Schraubenablesungen) in Wellenlängen	353
41 Die Formel von CORNU	353
42 Die Formel von HARTMANN	353
43 Die Berechnung der Formel (1) von CORNU	354
44 Die Berechnung der Formel (2) von HARTMANN	355
45 Der numerische Wert der Konstante α	357
46 Anschluß der HARTMANNSchen Formel an zahlreiche Messungswerte	358
47 Darstellung der Messungen durch die HARTMANNSche Gleichung	358
48 Auswahl der Linien zur Ableitung der Interpolationsformel	359
49 Abhängigkeit der Konstanten der Interpolationsformel von der Temperatur	360
50 Berechnung von Reduktionstabellen mittels der HARTMANNSchen Formel	362
51 Verwandlung von Wellenlängendifferenzen oder Schraubenablesungsdifferenzen in Kilometer	363
52 Bestimmung der Wellenlänge mit Hilfe der Interpolationsformeln	364
53 Bestimmung von Wellenlängen aus Konkavgitteraufnahmen	366
k) Die Bestimmung der Radialgeschwindigkeit eines Sternes mit Hilfe der Formeln von CORNU und HARTMANN	366
54 Einleitung	366
55 Erstes Verfahren	367
56 Zweites Verfahren	368
57 Die Reduktionsmethode von R H CURTISS	369
58 Die Messung und Reduktion von Spektren mit dem Spektrokomparator von HARTMANN	371

	Seite
59 Beschreibung des Apparates	373
60 Vorbereitungen zu den Messungen mit dem Spektrokomparator	375
61 Die Messungen selbst	376
62 Reduktion der Messungen	378
1) Systematische Fehler bei der Reduktion von Sternspektrogrammen	379
63 Einleitung	379
64 Fehler der Wellenlänge einer einzelnen Linie	379
65 Fehler des Wellenlangensystems	380
66 Fehler bei der Linienidentifizierung	380
67 Wellenlängen für die Linien der O- und B-Sterne	384
68 Systematische Unterschiede der auf verschiedenen Observatorien bestimmten Radialgeschwindigkeiten Der „General Catalogue“ von J H. MOORE	385
69 Verzeichnis von Fundamentalsternen für die Radialgeschwindigkeitsbestimmung	387
m) Reduktion der Radialgeschwindigkeiten auf die Sonne	388
70 Einleitung	388
71 Jährliche Bewegung der Erde	389
72 Monatliche Bewegung der Erde	391
73 Tägliche Bewegung der Erde	391
74 Bewegung der Erde durch planetare Störungen	391
75 Reduktion der Radialgeschwindigkeit auf den Schwerpunkt des Sonnensystems	391
76 Berechnung der Radialgeschwindigkeit eines Planeten gegen die Erde	392
77 Berechnung der Radialgeschwindigkeit des Mondes gegen die Erde	393
78 Spektrographische Bestimmung der Aberrationskonstante bzw der Sonnenparallaxe	394
79 Bestimmung der Rotation eines Planeten durch spektrographische Beobachtungen	396
80 Spektrographische Bestimmung der Rotationsperiode der Saturnringe	399
n) Die Bestimmung von Radialgeschwindigkeiten mit dem Objektivprisma	401
81 Erste Versuche	401
82 Benutzung der Neodymlinie	402
83 Dritte Methode von PICKERING	403
84 Die Methode von PICKERING-ORBINSKY	406

Kapitel 5

Apparate und Methoden zur Messung der Gesamtstrahlung der Himmelskörper.

Von Dr. W E BERNHEIMER, Wien

(Mit 53 Abbildungen)

a) Allgemeines zur Messung der Gesamtstrahlung	407
1 Einleitende Bemerkungen	407
2 Das Prinzip der Meßapparate	408
3 Definition der Begriffe bolometrische und radiometrische Größe, Wasserzellenabsorption und Wärmeindex	410
b) Selektive Strahlungsmessungen im Infraroten	413
4 Die Anwendung der Selenzellen	413
5 Versuche mit Photozellen im Infraroten	416
6 Die Erschließung des langwelligen Spektralbereiches mittels der photographischen Platte	416
c) Aktinometer und Pyrheliometer zur Messung der Gesamtstrahlung der Sonne	420
7. Allgemeines Einige Typen sekundärer Meßinstrumente	420
8. Das sekundäre Silver-Disk-Pyrheliometer	422
9 Das primäre K ÄNGSTRÖMSCHE Kompensationspyrheliometer	424
10 Die Primärinstrumente der Smithsonian-Observatorien	426
d) Bolometer und Spektrobolometer zur Messung der Gesamtstrahlung der Sonne	429
11 Historische Bemerkungen	429
12 Die Apparate von S P LANGLEY und C G ABBOT	430
13 Spektrobolometer und Meßmethode von J WILSON	432
14 Das Verfahren der Smithsonian-Beobachter zur Bestimmung der Energieverteilung im Sonnenspektrum	435
15 Das Verfahren der Smithsonian-Beobachter zur Ableitung der Solarkonstante nach der „langen Methode“	439

	Seite
e) Das Pyranometer und seine astrophysikalische Anwendung	443
16 Typen des Pyranometers	443
17 Die Anwendung des Pyranometers bei den „kurzen“ Methoden zur Bestimmung der Solarkonstante	446
f) Die Ergebnisse der Messungsmethoden der Solarkonstante	448
18 Die Zuverlässigkeit der Pyranometermessungen	448
19 Versuche zur Verbesserung „definitiver“ Werte der Solarkonstante	450
20 „Preferred Solar Constants“	452
g) Bolometer und Thermoelement bei Strahlungsuntersuchungen der Sonnenflecke und der Korona	453
21 Die Arbeiten von 1905 und 1922 zur Intensitätsmessung der Sonnenflecke	453
22 Die Untersuchungen der Korona mit Bolometer und Thermosaule	456
h) Anwendung der Thermoelemente zur Messung der ultravioletten Sonnenstrahlung	460
23 Die Apparatur von E PETTIT zur Strahlungsmessung bei λ 3200	460
24 Methoden zur Reduktion der Beobachtungen	462
25 Das Meßverfahren von W W COBLENTZ und R STAIR	463
26 PETTITS Meßanordnung zur Bestimmung der spektralen Energieverteilung	463
i) Methoden und Instrumente zur Messung der Gesamtstrahlung der Planeten und Fixsterne mit Thermoelementen und Radiometern	466
27 Historische Untersuchungen	466
28 Die Radiometermessungen von E F NICHOLS	467
29 Die Untersuchungen von A H PFUND	468
30 Die thermoelektrischen Meßinstrumente von W W COBLENTZ	470
31 Die Untersuchungen von W W COBLENTZ	472
32 Die thermoelektrischen Meßinstrumente auf der Mt Wilson-Sternwarte	474
33 Die Untersuchungen von E PETTIT und S B NICHOLSON	478
j) Die Messung der Energieverteilung in den Sternspektren mit Hilfe des Bolometers	483
34 Die Anordnung der Mt Wilson-Versuche von 1922	483
35 Der Beobachtungsvorgang	485
k) Die Messung der Energieverteilung in den Sternspektren mit Hilfe des Radiometers	486
36 Erste Versuche und Reduktionsmethoden	486
37 Die neuen Radiometermessungen von C G ABBOT	489
l) Möglichkeiten verfeinerter Apparate für künftige Strahlungsmessungen der Himmelskörper	493
38 Neueste Pyrhelometerotypen	493
39 Verbesserte Absolutpyrhelometer	494
40 Moderne Formen von Thermoelementen	497
41 Das Kampometer	500

Kapitel 6

Reduktion photographischer Himmelsaufnahmen

Von Dr ARTHUR KONIG, Jena

(Mit 7 Abbildungen)

a) Einleitung	502
1 Vorbemerkungen	502
2 Zusammenstellung der wichtigsten Bezeichnungen	502
b) Aufnahme und Ausmessung	503
3 Objektive	503
4 Fokusbestimmung	504
5 Aufnahme, Behandlung der Platte	505
6 Ausmessung	506
c) Tangentiale Koordinaten und ihre Transformation	507
7 Definition der Tangentialkoordinaten	507
8 Beziehung zwischen zwei Tangentialkoordinatensystemen	508
9 Transformation der Tangentialkoordinaten in A R und Dekl und umgekehrt	511
10 Umformung der Transformationsformeln in Ziff 9 für numerische Zwecke	513
d) Verbesserungen der gemessenen Koordinaten	517
11 Übersicht über die verschiedenen Verbesserungen	517

	Seite
α) Instrumentelle Verbesserungen	517
12 Skalenwert, Orientierung und Nullpunktsfehler	517
13 Plattenneigung	519
β) Sphärische Verbesserungen	522
14 Allgemeines über die photographische Refraktion	522
15 Ableitung der Refraktionsformeln	524
16 Numerische Berechnung der Refraktion Restrefraktion	529
17 Aberration	532
18 Präzession und Nutation	533
e) Anschluß an die Anhaltsterne	534
19 Vorbereitungen	534
20 Ausgleichung	535
21 Ableitung von Instrumentalfehlern aus den Ausgleichungsresten	538
22 Gesamtübersicht über den Reduktionsgang	539
Anhang I Hilfstafeln zur Transformation tangentialer Koordinaten	541
Anhang II Photographische Refraktionstafeln	555
Ergänzung zu Bd II, Teil 2, S 495 ff Die internationale Polarsequenz	560
Sachverzeichnis	561

Kapitel 1

Grundlagen der theoretischen Optik.

Von

H SCHULZ-Berlin

Mit 50 Abbildungen

a) Polarisation

1 Grundlagen Die theoretische Optik, solange sie sich nicht mit der Frage der Entstehung des Lichtes und seiner besonderen Natur befaßt, sondern nur eine Erklärung der Erscheinungen geben soll, die als räumliche oder zeitliche Änderungen der Energieverteilung, zuweilen auch als Überlagerungsvorgänge aufgefaßt werden müssen, kann sich meist auf die klassischen Vorstellungen der Wellentheorie beschränken, obwohl in einigen Sonderfällen ein Hineinbeziehen des Begriffs Lichtquant nicht zu umgehen ist. Im wesentlichen handelt es sich bei der Polarisation des Lichtes ebenso wie bei der Beugung und Interferenz um rein mathematische Beziehungen zwischen den Amplituden und Phasen der im einfachsten Falle als Sinusschwingungen zu betrachtenden Lichtwellen und den Ortsgrößen. Daher ist auch zunächst keine Annahme über die Natur des Trägers der Lichtwellen notwendig, nur eine Festlegung des Wellencharakters.

Die der modernen Optik ferne liegende Deutung des Lichtes als eines mechanischen Vorganges sei daher hier nur erwähnt und als Grundlage die elektromagnetische Theorie angenommen, die aus den allgemeinen Feldgleichungen für isotrope homogene Medien für die Lichtausbreitung folgert, wenn als Fortpflanzungsrichtung die positive x -Achse gewählt wird

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E}_x &= 0, & \mathcal{H}_x &= 0, \\ \mathcal{E}_y &= \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} f\left(t - \frac{z}{q}\right), & \mathcal{H}_y &= -g\left(t - \frac{z}{q}\right), \\ \mathcal{E}_z &= \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} g\left(t - \frac{z}{q}\right), & \mathcal{H}_z &= f\left(t - \frac{z}{q}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Die den elektrischen Vektor \mathcal{E} und den magnetischen \mathcal{H} bestimmenden Funktionen g und f sind als eindeutig, sonst aber beliebig anzusehen und brauchen zunächst nicht einmal periodisch zu sein. Beide Funktionen können unabhängig voneinander sein und bei Reflexion oder Brechung nach besonderen Gesetzen sich ändern, können aber auch teilweise oder ganz voneinander abhängig (kohärent) sein. Die Möglichkeit der Inkohärenz ist aber an die Bedingung geknüpft, daß für eine sehr große Zahl verschiedener Werte des Argumentes dieselben Werte von f und g sich ergeben, was nur dann sein kann, wenn die Funktionen f und g mit hoher Frequenz periodisch sind. Man betrachtet daher die Lichtausbreitung als eine Fortpflanzung elektromagnetischer Wellen¹, und zwar handelt

¹ Handb. der Astrophysik III, 1 Kap., S. 1 (1930)

es sich um Transversalwellen, bei denen der die Amplitude darstellende Vektor senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung ist. Zu jedem elektrischen Vektor gehört ein magnetischer, so daß es genügt, das Verhalten eines derselben zu bestimmen, um die möglichen Veränderungen durch Reflexion oder Brechung angeben zu können.

Die Lehre von der Polarisation des Lichtes bezieht sich auf die Veränderungen der Vektoren, die durch die Funktionen f und g dargestellt sind. Durch ihr verschiedenes Verhalten bei der Reflexion und Brechung an der Grenzfläche optisch verschiedener, also durch verschiedene Werte von ε gekennzeichneten Medien lassen sich die Komponenten f und g trennen, ebenso auch durch Einwirkung geeigneter Blenden (Gitterpolarisation), ferner durch Einlagerung mehr oder weniger fein verteilter Materie in das ursprünglich vorhandene Medium (Stäbchen- und Plattendoppelbrechung, Polarisation durch Streuung in trüben Medien).

Besondere Erscheinungen zeigen sich bei denjenigen Körpern, bei denen die Dielektrizitätskonstante ε von der Richtung abhängig ist und somit auch für die Funktionen f und g verschiedene Werte annehmen kann. Ein solches Verhalten kann entweder durch die Struktur des Molekulargitters bedingt sein (Kristalle), oder es kann durch äußere mechanische oder thermische Einflüsse hervorgerufen werden (akzidentelle Doppelbrechung).

Von Bedeutung für die Astrophysik sind vor allem die in trüben Medien auftretenden Änderungen des Polarisationszustandes insofern, als alle Himmelserscheinungen nur durch die Atmosphäre hindurch beobachtet werden können und die durch sie hindurchgehenden Lichtwellen in ihr durch Staub, Wasserteilchen in fester, flüssiger und gasförmiger Beschaffenheit und schließlich durch die Luftmoleküle selbst beeinflusst werden. Zum Nachweis dieser, Lage und Größe der Vektoren \mathcal{E} und \mathcal{H} betreffenden Einflüsse werden vorwiegend die bei Reflexion, Brechung und Doppelbrechung auftretenden Amplituden- und Phasenänderungen benutzt, so daß letztere die Grundlage für die Kenntnis der Wirkungsweise der hierher gehörigen Beobachtungsinstrumente bilden.

2 Reflexion und Brechung¹ Das physikalische Problem der Reflexion und Brechung führt im Falle isotroper homogener Körper zunächst zu der Folgerung, daß außer der einfallenden Welle eine reflektierte und eine gebrochene vorhanden

sein muß (Abb 1), für die aus den allgemeinen Gleichungen und den Grenzbedingungen das Reflexions- und Brechungsgesetz in der bekannten Form

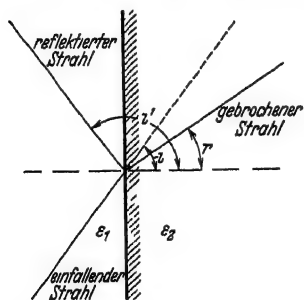


Abb 1 Reflexion und Brechung bei isotropen Körpern

$$\left. \begin{aligned} i' &= \pi - i, \\ \frac{\sin i}{\sin r} &= \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} = n \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(n = Brechungszahl) folgt, für die Wellenfunktionen f_2 und g_2 der reflektierten und diejenigen f_1' und g_1' der gebrochenen Welle findet man dann in Abhängigkeit von denen f_1 und g_1 des einfallenden Lichtes

$$\begin{aligned} f_2 &= \mu f_1, & g_2 &= \sigma g_1, \\ f_1' &= \mu' f_1, & g_1' &= \sigma' g_1, \end{aligned}$$

wobei die Proportionalitätskonstanten, die als FRESNELsche Koeffizienten bezeichnet werden, die Werte haben

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \frac{\operatorname{tg}(i - r)}{\operatorname{tg}(i + r)}, & \sigma &= -\frac{\sin(i - r)}{\sin(i + r)}, \\ \mu' &= \frac{\sin 2i}{\sin(i + r) \cos(i - r)}, & \sigma' &= \frac{\sin 2i}{\sin(i + r)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

¹ M. PLANK, Einführung in die theore. Optik Leipzig 1927

Betrachtet man nunmehr, wie vorher bemerkt, als maßgebend für die Fortpflanzung der Lichtwellen den elektrischen Vektor und bezeichnet demgemäß als Schwingungsebene die durch elektrische Feldstärke und Strahlrichtung bestimmte Ebene, so folgt, daß für einen bestimmten Winkel i_B , für den

$$\operatorname{tg} i_B = n$$

ist (BREWSTERScher Winkel), μ verschwindet und das reflektierte Licht nur noch eine Schwingung enthält, die senkrecht zur Einfallsebene ist. Letztere heißt dann die Polarisationssebene, das unter dem Polarisationswinkel i_B reflektierte Licht selbst linear polarisiert. Es stellt den einen möglichen Grenzfall der Ausbreitung der Lichtwellen dar, während der zweite Grenzfall derjenige ist, für den die voneinander unabhängigen Wellenfunktionen der Bedingung $f^2 = \bar{g}^2$ genügen, wie es bei der Strahlung eines durch Temperaturerhöhung leuchtend gemachten Körpers festzustellen ist. Bei dem so definierten natürlichen Licht sind also die Mittelwerte beider Vektoren einander gleich. Zwischen den beiden Grenzfällen liegt die Strahlung, für die das Verhältnis der Mittelwerte f^2/\bar{g}^2 von Null oder Eins verschieden ist. Solches Licht heißt teilweise (partiell) polarisiert.

Bei jeder Reflexion und Brechung wird danach das Verhältnis f/g der beiden Wellenfunktionen verändert und damit auch der Polarisationszustand des Lichtes, nur nicht für senkrechten und für streifenden Einfall ($i = 0^\circ$ und $i = 90^\circ$). Nach den Gleichungen (3) ergibt sich für die Intensität I_r des reflektierten Lichtes bei senkrechtem Einfall, da die Intensität dem Vektor der elektromagnetischen Energiestrahlung $\mathfrak{S} = \frac{c}{4\pi} [\mathfrak{E}, \mathfrak{H}]$ proportional ist,

$$I_r = I_0 \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2,$$

bei streifendem Einfall

$$I_r = I_0$$

Führt man zur Kennzeichnung des Polarisationszustandes die Größe

$$\frac{\bar{f}^2 - \bar{g}^2}{\bar{f}^2 + \bar{g}^2} = II$$

ein, die den Polarisationsgrad, den Überschuß des linear polarisierten Lichtes bezogen auf die gesamte Lichtstrahlung, angibt, so findet man für einen beliebigen Einfallswinkel

$$I_r = \frac{I_0}{2} [\mu^2(1 + II) + \sigma^2(1 - II)] \quad (4)$$

und daher als Reflexionskoeffizienten

$$\varrho = \frac{1}{2} [\mu^2(1 + II) + \sigma^2(1 - II)], \quad (5)$$

während der Polarisationsgrad der reflektierten Welle wird

$$\pi' = \pm \frac{\mu^2(1 + II) - \sigma^2(1 - II)}{\mu^2(1 + II) + \sigma^2(1 - II)} \quad (6)$$

Bei Einfall natürlichen Lichtes ergibt sich dann für den Reflexionskoeffizienten

$$i = 45^\circ, \quad \varrho = \frac{n^2(n^2 - \sqrt{2n^2 - 1})^3}{(n^2 - 1)^4},$$

$$i = i_B, \quad \varrho = \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right)^2$$

Will man also polarisiertes Licht durch Reflexion erzeugen, so ist für den überhaupt in Betracht kommenden Bereich der Brechungszahlen die Intensität des zurückgeworfenen Lichtes stets klein. Sie kann sogar auf einen verschwindend geringen Betrag herabgedrückt werden, wenn mehrere Reflexionen nacheinander eingeschaltet werden, womit ein einfaches Mittel zur meßbaren Abschwächung des Lichtes gegeben ist. Da für den Polarisationswinkel $\mu = 0$ ist, der Reflexionskoeffizient also den Wert

$$\rho = \frac{1}{2} \sigma^2 (1 - \Pi)$$

annimmt, kann bei einer zweiten Reflexion unter dem Polarisationswinkel bei Drehung der Einfallsebenen gegeneinander die Intensität des reflektierten Lichtes nur noch zwischen 0 und $\frac{I_0}{2} \sigma^4 (1 - \Pi)$ liegen, weil das auf die zweite Fläche auffallende Licht den Polarisationsgrad ± 1 hat, wobei zu beachten ist, daß bereits bei der ersten Reflexion eine Schwächung auf mindestens $\sigma^2/2$ der ursprünglichen Intensität eingetreten ist. Bei strenger Betrachtung ist diese auf das MERZSCHE Polarisationsokular bezügliche Überlegung nicht zulässig, weil die Trennungsfläche zweier Medien niemals eine ideale ist, sondern eine Folge von Schichten mit veränderlichem Brechungsindex darstellt, deren Dicken von der Herstellung und dem Alter der Oberfläche abhängig sind.

Besser ist es daher, für Intensitätsänderungen die Veränderlichkeit der Brechungszahlen zu benutzen, wie dies beim COLZISCHEN Okular geschieht¹. Unterscheidet sich der relative Brechungsindex nur wenig von der Einheit, so wird auch noch für $i = 45^\circ$ der Reflexionskoeffizient von hoher Ordnung klein. Ist $n = 1 + \varepsilon$, so wird $\rho = \frac{1}{2} \varepsilon^2$. Freilich kann dabei der Polarisationsgrad nie den Wert Null annehmen und somit eine vollkommene Auslöschung nicht eintreten, doch ist man von den Störungen durch Oberflächenschichten ziemlich frei.

Für die Komponenten des in das zweite Medium eindringenden Lichtes geben die Gleichungen (3) die Durchlassigkeitskoeffizienten, wenn man beachtet, daß die Geschwindigkeit der Welle und auch der Querschnitt derselben beim Übergang über die Grenze sich ändert. Einfacher ist es, das Prinzip der Erhaltung der Energie zu benutzen und die Intensität der durchgelassenen Strahlung als Differenz der einfallenden und der reflektierten zu berechnen. So findet man für das in der Einfallsebene schwingende Licht

$$1 - \mu^2 = \frac{\sin 2i \sin 2r}{\sin^2(i + r) \cos^2(i - r)} \quad (7)$$

und für die Komponente senkrecht zur Einfallsebene

$$1 - \sigma^2 = \frac{\sin 2i \sin 2r}{\sin^2(i + r)} \quad (8)$$

Das Verhältnis der Strahlungskomponenten in der durchgelassenen Strahlung ist $\cos^2(i - r)$, kann daher für keinen Einfallswinkel Null oder Unendlich werden, das durchgelassene Licht ist bei Einfall natürlichen Lichtes immer nur teilweise polarisiert. Erst bei einer großen Zahl nacheinander stattfindender Brechungen nähert sich dieses Verhältnis dem Wert Null, und zwar um so eher, je größer die Ablenkung bei der einzelnen Brechung, je größer also der Einfallswinkel ist. Bei den zur Polarisation des Lichtes benutzten Glasplattensätzen ist deshalb Einhaltung des Polarisationswinkels als Einfallswinkel nicht erforderlich. Durch Vergrößerung desselben läßt sich sogar die Anzahl der Platten, die zur Erzielung eines bestimmten Polarisationsgrades erforderlich sind, vermindern,

¹ Handb. der Astrophysik IV, S. 62 (1928)

doch muß beachtet werden, daß mit wachsendem Einfallswinkel die Intensität des durchgelassenen Lichtes schnell abnimmt

Abgesehen von der Unvollkommenheit der Polarisation tritt bei Glasplattensätzen noch der Ubelstand auf, daß die mehrfach reflektierten Wellen sowohl die Intensität als auch den Polarisationsgrad des durchgelassenen Lichtes beeinflussen, so daß für Meßzwecke dieses Hilfsmittel kaum in Betracht kommt, zumal eine rechnerische Ermittlung beider Größen dadurch erschwert, wenn nicht unmöglich gemacht wird, daß die Teilwellen kohärent sind und interferieren müssen. Eine regelmäßige Beeinflussung kann aber nur dann stattfinden, wenn jede der Platten ebensowohl wie die Zwischenluftschichten streng planparallel sind. Nur im Falle einer einzelnen Planparallelplatte können Theorie und Praxis vergleichbare Werte ergeben und rechtfertigen die Benutzung einer solchen als Kompensator bei Messungen des Polarisationsgrades. Bei der im Vergleich zur Wellenlänge relativ großen Dicke solcher Platten kann man wenigstens bei Benutzung weißen Lichtes die Interferenzwirkungen vernachlässigen.

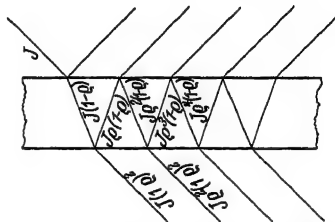


Abb 2 Aufspaltung eines Strahles durch eine Planparallelplatte

Unter diesen Voraussetzungen ist gemäß Abb 2 für jede der Komponenten

$$I_D = I_e(1 - \varrho)^2 + I_o\varrho^2(1 - \varrho)^2 + \quad = I \frac{1 - \varrho}{1 + \varrho}, \quad (9)$$

und damit das Verhältnis derselben

$$\frac{I_D'}{I_D} = \frac{1 - \sigma^2}{1 + \sigma^2} \frac{1 + \mu^2}{1 - \mu^2}, \quad (10)$$

so daß bei Änderung des Einfallswinkels das Intensitätsverhältnis innerhalb der Grenzen Eins und

$$\frac{2n^2}{n^2 + 1}$$

variiert. Immerhin ist eine experimentelle Prüfung zu empfehlen, da eine strenge Einhaltung obiger Bedingungen fraglich ist.

3 Elliptisch polarisiertes Licht Stellt man die Wellenfunktionen f und g für linear polarisiertes Licht in einfachster Form als Sinusschwingungen dar, wozu man berechtigt ist, da mindestens innerhalb eines gewissen Intervalles jede Funktion nach dem FOURIERSchen Theorem in solche zerlegt werden kann, so ist die Schwingungsweite für einen gegebenen Ort x zu einer bestimmten Zeit t

$$s_y = A_y \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \delta_1 \right] \quad (11)$$

Bei zwei in gleicher Richtung fortschreitenden Wellen gleicher Wellenlänge λ und damit gleicher Schwingungszeit T , aber verschiedener Phase δ , entsteht eine neue lineare Welle von geänderter Amplitude A und anderer Phase. Die Werte dieser lassen sich durch Elimination des mit der Zeit und dem Orte veränderlichen Ausdrucks $2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$ berechnen, und man findet

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\delta_1 - \delta_2), \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{A_1 \sin \delta_1 + A_2 \sin \delta_2}{A_1 \cos \delta_1 + A_2 \cos \delta_2} \quad (12)$$

Bilden aber die Schwingungsebenen zweier Wellen einen Winkel miteinander, so ergibt die Elimination von $2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$ für die Bahn des Endpunktes des Lichtvektors eine Ellipse, deren Achsen die Extremwerte des Lichtvektors

darstellen. Nur wenn die Differenz der Phasenwinkel Null oder ein ganzes Vielfaches von π ist,artet diese elliptische Schwingung in eine lineare aus. Selbstverständlich können die Achsen der Ellipse in gewissen Fällen auch gleich werden, so daß die Bahn in einen Kreis übergeht (zirkular polarisiertes Licht).

In den weitaus meisten Fällen werden die Schwingungsebenen der zu überlagernden Wellen einen Winkel von 90° miteinander bilden. Trifft dies nicht zu, so lassen sich die unter einem Winkel α gegeneinander geneigten Schwingungen zunächst auf zwei in senkrechten Ebenen erfolgende transformieren, so daß die in den Ebenen A_1 und A_2 erfolgenden, nach (11) darstellbaren Grundschwingungen (Abb 3) eines durch O senkrecht zur Zeichenebene verlaufenden Strahles in den Ebenen P und Q die Schwingungen s_P und s_Q ergeben

$$s_P = A_1 \cos \gamma \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \delta_1 \right] + A_2 \cos(\alpha + \gamma) \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \delta_2 \right],$$

$$s_Q = A_1 \sin \gamma \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \delta_1 \right] + A_2 \sin(\alpha + \gamma) \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \delta_2 \right]$$

Diese können nach (12) in jeder Ebene in eine neue lineare Schwingung verwandelt werden, deren Konstanten also aus den anfanglich gegebenen ermittelt werden können. Schreibt man abkürzend

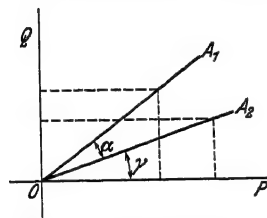


Abb 3 Zusammensetzung zweier linear polarisierter Wellen

$$s_P = B_1 \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + A_1 \right],$$

$$s_Q = B_2 \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + A_2 \right],$$

so folgt schließlich für die Bahn des Vektorendpunktes

$$\frac{s_P^2}{B_1^2} + \frac{s_Q^2}{B_2^2} - \frac{2s_P s_Q}{B_1 B_2} \cos(A_1 - A_2) = \sin^2(I_1 - I_2) \quad (13)$$

und daraus für das Achsenverhältnis a/b und den Winkel β der Achsen zu den gewählten Hauptrichtungen P und Q

$$\operatorname{tg} 2\beta = \frac{2B_1 B_2 \cos(A_1 - A_2)}{B_1^2 - B_2^2}, \quad \left(\frac{a}{b} \right)^2 = \frac{B_1^2 + B_2^2 + \sqrt{B_1^4 + B_2^4 + 2B_1^2 B_2^2 \cos 2(I_1 - I_2)}}{B_1^2 + B_2^2 - \sqrt{B_1^4 + B_2^4 + 2B_1^2 B_2^2 \cos 2(I_1 - I_2)}}. \quad (14)$$

Natürlich ist hierbei vorausgesetzt, daß die betrachteten Partialschwingungen kohärent sind, andernfalls ist es unmöglich, von einer konstanten Phasendifferenz zu sprechen, und die Schwingungsellipse würde einer schnellen zeitlichen Veränderung unterworfen sein, die Lichtwelle also in ihrem Verhalten durchaus dem des natürlichen Lichtes zu vergleichen sein.

Phasendifferenzen zweier in senkrechten Ebenen erfolgenden Schwingungen treten nun auf sowohl bei Reflexion in der Nähe des Polarisationswinkels wie auch bei dem noch nicht erwähnten Fall der Totalreflexion, ferner beim Durchgang durch doppelbrechende Medien.

Wie schon erwähnt, ist für alle Grenzflächen, selbst für die durch Spaltung von Kristallen erhaltenen, anzunehmen, daß die Eigenschaften der benachbarten Medien nicht sprunghaft ineinander übergehen, sondern daß innerhalb einer wenn auch nur sehr dünnen, aber doch in ihren Abmessungen den Lichtwellenlangen vergleichbaren Schicht ein stetiger Übergang erfolgt, die Dicke dieser Schicht ist bei natürlichen Bruch- und Spaltungsflächen am geringsten, wächst aber mit der Zeit infolge adhaerierender Gas- und Wasserschichten an, so daß bei diesen ebenso wie bei polierten Flächen mit einer zeitlichen Änderung des Einflusses dieser Oberflächenschichten gerechnet werden muß. Er wirkt sich dahin

aus, daß die beiden in und senkrecht zu der Einfallsebene polarisierten Teilwellen eines auffallenden Lichtbündels eine Phasenverschiebung erleiden, die mit wachsendem Einfallswinkel größer wird und im Polarisationswinkel den absoluten Betrag $\pi/2$ annimmt. Zu unterscheiden ist dabei zwischen sog. positiven Substanzen, für die eine Voreilung der senkrecht zur Einfallsebene polarisierten Komponente festgestellt ist, und negativen Substanzen, bei denen das entgegengesetzte Verhalten sich zeigt. Für 90° entspricht die Phasenverschiebung einer halben Wellenlänge (π). Feste Substanzen mit einem Brechungsindex kleiner als 1,46 sind im allgemeinen positiv, solche mit größerem negativ.

Diese von BREWSTER¹ und JAMIN² auf Grund experimenteller Untersuchungen gezogenen Folgerungen decken sich jedoch nicht vollständig mit den Ergebnissen späterer Arbeiten. Der Einfallswinkel, für den der Phasenunterschied genau einer Viertel Wellenlänge entspricht, weicht im allgemeinen um einen meßbaren Betrag von dem Polarisationswinkel ab, und zwar wächst diese Abweichung mit wachsendem Brechungsindex und wachsender Dicke der Oberflächenschicht. Nach SISSINGH und GROOSMULLER³ läßt sich die Abweichung des durch den Gangunterschied $|\pi/2|$ definierten Haupteinfallswinkels H von dem BREWSTERschen Winkel als Funktion der Brechungsindizes der beiden an der Grenzfläche zusammenstoßenden Medien und einer die Beschaffenheit der Oberflächenschicht selbst kennzeichnenden Größe darstellen. Ob freilich diese Darstellung in allen Fällen ausreichend ist, erscheint noch zweifelhaft, weil sie unter der Voraussetzung abgeleitet ist, daß die Oberflächenschicht in ihren einzelnen Teilen als isotrop anzusehen ist, was mit der von RAYLEIGH⁴ beobachteten Umwandlung von „positiver“ in „negative“ Reflexion durch Druck nicht vereinbar ist, da die Möglichkeit einer solchen auf Anisotropie der Oberflächenschichten hinweist.

Versuche von LUMMER, SORGE und VOLKE⁵ legen einen Zusammenhang mit molekularen Druckwirkungen nahe, und es hat sich gezeigt, daß auch bei Zugrundelegung anisotroper Oberflächenschichten Formelausdrücke sich ergeben, die zur Darstellung der beobachteten Erscheinungen geeignet sind.

Tritt in diesen Fällen die Elliptizität des Lichtes als eine Störung der einfachen Reflexionsverhältnisse auf, die aber kaum einen nennenswerten Einfluß ausübt, weil sie sich auf ein verhältnismäßig kleines Winkelintervall in der Nähe des Polarisationswinkels beschränkt und hier infolge der geringen Intensität der senkrecht zur Einfallsebene schwingenden Welle immer nur zu einer außerordentlich gestreckten elliptischen Schwingungsbahn, die praktisch fast immer als linear anzusehen ist, führt, so läßt sich die bei Totalreflexion auftretende Elliptizität sehr gut benutzen, um sämtliche möglichen Formen von Schwingungsellipsen herzustellen.

Grundsätzlich gelten die FRESNELschen Formeln auch für das Gebiet der Totalreflexion, also diejenigen Strahlen, für die nach dem Brechungsgesetz kein reeller Brechungswinkel sich ergibt. Wie die eingehende Behandlung des Problems zeigt, existiert zwar eine gebrochene Welle, jedoch schreitet diese im zweiten Körper parallel zur Grenzfläche fort in einer Schicht, deren Dicke von der Größenordnung einer Wellenlänge ist. Um zu physikalisch deutbaren Ausdrücken zu gelangen, braucht man nur die komplexe Lösung in ihren reellen und ihren imaginären Teil zu zerlegen, wobei man findet, daß jede der Teilwellen bei der Reflexion einen Phasensprung an der Grenzfläche erleidet. Die für den Schwingungszustand der gesamten reflektierten Wellen maßgebende

¹ Phil Trans 1815, S 125

² Ann Chim Phys (3) 29, S 263 (1850), 31, S 165 (1850)

³ Z f Phys 27, S 518 (1926)

⁴ Rep Brit Ass 1887, S 585

⁵ O LUMMER u. K. SORGE, Ann d Phys (4) 31, S 325 (1910), M. VOLKE, ebenda S 609

Phasendifferenz Δ der Hauptkomponenten ist beim Einfallssazimut 45° gegeben durch

$$\operatorname{tg} \frac{\Delta}{2} = \frac{\cos \varphi \sqrt{\sin^2 \varphi - n^2}}{\sin \varphi}, \quad (15)$$

wenn man in diesem Falle mit n den Brechungsindex des dünneren Mediums bezogen auf den des dichteren bezeichnet. Der theoretische Höchstwert ist somit

$$\operatorname{tg} \frac{\Delta_{\max}}{2} = \frac{1 - n^2}{2n} \quad (15a)$$

In jedem Falle ist also das total reflektierte Licht elliptisch polarisiert. Eine kreisförmige Schwingungsbahn (zirkular polarisiertes Licht) ist aber nach (13) an die Bedingung geknüpft, daß die relative Phasendifferenz $\Delta_1 - \Delta_2 = \frac{\pi}{2}$ wird, was bei einmaliger Reflexion niemals erreicht werden kann, da nach (15a) der Höchstwert des Phasenunterschiedes bei einmaliger Reflexion immer unterhalb $\pi/2$ bleibt. Bei zweimaliger Reflexion hingegen ergeben sich zwei Einfallswinkel ι_1 und ι_2 , deren Werte sind

$$\begin{array}{lll} \frac{1}{n} = 1,5 & 1,55 & 1,6, \\ \iota_1 = 50^\circ 14' & 45^\circ 15,5' & 44^\circ 21', \\ \iota_2 = 53^\circ 13,5' & 57^\circ 5' & 56^\circ 41' \end{array}$$

Vorzuziehen ist der größere Reflexionswinkel, weil dann Abweichungen des Einfallswinkels vom richtigen Werte wegen des gestreckteren Verlaufs der Kurve $\Delta = f(\iota, n)$ kleinere Fehler ergeben. Durch Änderung des Einfallswinkels und Erhöhung der Zahl der Reflexionen läßt sich jeder beliebige Gangunterschied erzeugen.

Freilich ist nach Versuchen von KYNAST¹ die Anwendbarkeit der Formeln beschränkt, weil auch in diesem Fall, ähnlich wie bei der Reflexion in der Nähe des Polarisationswinkels, ein Einfluß der Oberflächenschichten vorhanden ist, der im allgemeinen die Phasendifferenz erhöht. Trotzdem ist die Anwendung des FRESNELSchen Parallelepipeds zur Erzeugung elliptisch und zirkular polarisierten Lichtes ein brauchbares Mittel, ebenso zur Analyse.

Läßt man auf ein solches Parallelepipед linear polarisiertes Licht so auffallen, daß der Winkel zwischen Polarisations- und Einfallsebene ϑ , das Verhältnis der Schwingungsweiten also $B_1/B_2 = \operatorname{ctg} \vartheta$ ist, so folgt, wenn man den Winkel, den die Achsen der Schwingungsellipse mit den Koordinatenachsen bilden, mit ψ bezeichnet,

$$\operatorname{tg} 2\psi = \operatorname{tg} 2\vartheta \cos(\Delta_1 - \Delta_2), \quad (16)$$

während für das Achsenverhältnis der Schwingungsellipse a/b sich ergibt

$$\frac{a}{b} = \operatorname{ctg} \varphi, \quad \sin 2\varphi = \mp \sin 2\vartheta \sin(\Delta_1 - \Delta_2) \quad (16a)$$

Je nach Wahl des Winkels ϑ , der durch Änderung der Lage der Polarisations-ebene beliebig verändert werden kann, ergibt sich also jedes Achsenverhältnis zwischen -1 und $+1$, d. h. alle Formen der Schwingungsellipse einschließlich des Kreises und der Geraden.

4. Natürliche Doppelbrechung² Wie schon erwähnt, zeigen eine Reihe von Körpern (Kristalle) eine Abhängigkeit der Dielektrizitätskonstanten von der Richtung. Um die Gesetze der Lichtausbreitung in solchen einfach darstellen zu können, kann man den Begriff der Wellenfläche benutzen, die durch die

¹ Inaug.-Diss. Breslau 1906

² F. POCKELS, Lehrbuch der Kristalloptik. Leipzig und Berlin 1904

Punkte gegeben ist, welche zur gleichen Zeit von einer Welle erreicht werden, die von einer innerhalb des Kristalles liegenden punktförmigen Lichtquelle ausgeht. Wenn der Körper eine innerhalb des betrachteten Raumgebietes vollkommen regelmäßige Gitterstruktur aufweist, was bei geringer Größe meist als zutreffend angenommen werden kann, so ist diese Wellenfläche eine zweischalige Fläche mit drei Symmetrieachsen, deren Lage durch die Symmetrieeigenschaften des Raumgitters gegeben ist. Die Radienvektoren dieser Fläche haben die Bedeutung von Lichtstrahlen, daher wird die Fläche auch als Strahlenfläche bezeichnet. Schneidet man aus einer solchen Strahlenfläche mittels einer Blende ein sehr kleines Stück heraus, das auch als Stück der Tangentialebene angesehen werden kann, so verschiebt sich dieses in einem kleinen Zeitintervall dt um $s \, dt$ in Richtung des Strahles, wo s die Strahlengeschwindigkeit bezeichnet, während die Verschiebung der Tangentialebene selbst in Richtung der Normalen durch $q \, dt$ gegeben ist (Abb 4). Die Normalengeschwindigkeit q ist demgemäß stets kleiner als die Strahlengeschwindigkeit s , und zwar

$$q = s \cos \alpha$$

α bezeichnet den Winkel zwischen Normale und Radiusvektor (Strahl).

Die Gesamtheit aller Fußpunkte bildet ebenfalls eine zweischalige Fläche (Wellennormalenfläche oder kurz Normalenfläche), die danach gleichzeitig Fußpunktfläche der Strahlenfläche ist. Bei Kenntnis einer dieser Flächen ist also das Verhalten eines Lichtbündels innerhalb eines Kristalls und bei Übergang über die Grenze vollkommen bestimmt. Für jede Richtung ergeben sich im allgemeinen Fall zwei Strahlengeschwindigkeiten und zwei Normalengeschwindigkeiten, die bestimmten Schwingungsrichtungen, also je einer linear polarisierten Komponente f bzw. g zugeordnet sind.

FRESNEL hat gezeigt, daß Strahlen- und Normalenfläche sowie die zugehörigen Polarisationsrichtungen der ihren beiden Schalen zugeordneten Teilwellen sich aus je einer einfachen Fläche ableiten lassen, und zwar die Strahlenfläche aus einem dreiaxigen Ellipsoid (FRESNEL'sches Ellipsoid)

$$n_1^2 x^2 + n_2^2 y^2 + n_3^2 z^2 = 1,$$

die Wellennormalenfläche dagegen aus dem Indexellipsoid (Elastizitätellipsoid)

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1$$

Aus diesen Flächen findet man die anfangs eingeführten zweischaligen Flächen, indem man senkrecht zu der Richtung der Strahlen bzw. der Normalen eine Ebene durch den Mittelpunkt des Ellipsoids legt und die Größe der Halbachsen feststellt. Die Strahlengeschwindigkeiten sind durch die Größe der Halbachsen des Schnittes des FRESNEL'schen Ellipsoids, die Normalengeschwindigkeiten durch die reziproken Werte der Halbachsen des Schnittes des Indexellipsoids gegeben, ferner sind die Halbachsen im letzteren Falle gleichzeitig die Normalen der zugehörigen Polarisations Ebenen.

Die analytische Behandlung führt für die durch die Richtungskosinus v_1, v_2, v_3 gekennzeichnete Normalenrichtung zu der quadratischen Gleichung

$$q - \frac{1}{n_1^2} + \frac{v_2^2}{q - \frac{1}{n_2^2}} + \frac{v_3^2}{q - \frac{1}{n_3^2}} = 0, \quad (17)$$

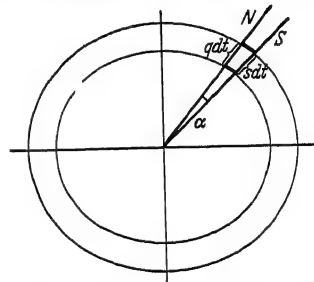


Abb 4 Strahlen- und Wellengeschwindigkeit bei einem Kristall

aus der die Normalengeschwindigkeit berechnet werden kann. Meist genügt die Kenntnis der Normalengeschwindigkeiten, da diese praktisch von größerer Bedeutung sind als die Strahlengeschwindigkeiten und da für die Brechung der Wellennormale auch das einfache Brechungsgesetz in der Form gilt

$$\frac{\sin i}{q} = \frac{\sin r'}{q'} = \frac{\sin r''}{q''}, \quad (18)$$

wo i den Einfallswinkel, r' und r'' die Brechungswinkel, q die Normalengeschwindigkeit im ersten, q' und q'' diejenigen im zweiten Medium bedeuten.

Je nach der Struktur des Molekulargitters können nun drei verschiedene Fälle unterschieden werden, die sich auf die Größe der Hauptbrechungsindizes zurückführen lassen, nämlich

1 $n_1 = n_2 = n_3$ Regulare Kristalle, deren optisches Verhalten demjenigen isotroper Körper gleich ist

2 $n_1 = n_2, n_3 \neq n_1$ Einachsige Kristalle, bei denen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Teilwelle (der ordentlichen) unabhängig von der Richtung wird und beide Schalen sich berühren, wobei die zu einer Kugel ausartende Schale die elliptische (der außerordentlichen Welle zugehörige) umschließt ($n_3 > n_1$) oder aber von der elliptischen umschlossen wird ($n_3 < n_1$). Die Verbindungslinie der Berührungspunkte gibt die Richtung an, in der die Fortpflanzungsgeschwindigkeit für beide Wellen gleich ist (Achsenrichtung) und der Körper sich wie ein isotroper verhält,

3 $n_1 \neq n_2 \neq n_3$ Zweiachsige Kristalle, bei denen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit beider Wellen von der Richtung abhängig ist. Aus Gleichung (17) ergibt sich eine Doppelwurzel für die Richtungen

$$v_1 = \pm \frac{n_3}{n_2} \sqrt{\frac{n_2^2 - n_1^2}{n_3^2 - n_1^2}}, \quad v_2 = 0, \quad v_3 = \pm \frac{n_1}{n_2} \sqrt{\frac{n_3^2 - n_2^2}{n_3^2 - n_1^2}},$$

falls $n_1 < n_2 < n_3$ ist. Diese Vorzugsrichtungen sind die Richtungen der beiden Achsen.

Als regulär im optischen Sinne können angesehen werden die Kristalle des regulären Systems mit 9 Symmetrieebenen und 3 Hauptsymmetrieachsen, als einachsig diejenigen des hexagonalen und quadratischen Systems (mit 7 bzw. 5 Symmetrieachsen und 1 Hauptsymmetrieachse), während die übrigen (rhombisches, monoklines, triklinen System) meist zweiachsig sind, jedoch läßt sich eine eindeutige Beziehung schon deshalb nicht angeben, weil das optische Verhalten der Kristalle wesentlich von der Wellenlänge des Lichtes und von der Temperatur abhängig ist. Es ist möglich, daß ein Kristall für eine bestimmte Wellenlänge zweiachsig, für andere einachsig sein kann, daß die Indexfläche eines Kristalls mit der Temperatur so weitgehend sich verändert, daß bei bestimmtem Warmegrad die Zweiachsigkeit in Einachsigkeit und diese auch in optisch reguläres Verhalten übergehen kann. Selbst Kristalle des regulären Systems können eine merkliche Doppelbrechung aufweisen, wie dies von LORENTZ beim Steinsalz nachgewiesen ist.

Ebenso zu werten sind die Regeln, die das optische Verhalten in Beziehung setzen zu dem chemischen Bau der Körper. Richtig ist, daß im allgemeinen mit wachsender Größe des Moleküls die optische Symmetrie abnimmt. Die Schwierigkeiten einer eindeutigen Klassifizierung liegen auch zum Teil in der Tatsache, daß bei geringem Unterschied der Hauptbrechungsindizes Zweifel entstehen können, welcher optischen Gruppe der betreffende Körper zuzuordnen ist. Die bei stärkerem Unterschied der Hauptbrechungsindizes eintretende starke räumliche Trennung der beiden in einem Kristall sich fortpflanzenden Wellen

bietet ein einfaches Mittel zur Polarisierung des Lichtes, wobei eine derselben durch Ablenkung, durch Reflexion oder Brechung oder endlich durch Absorption ausgeschaltet wird

Den ersten Fall findet man bei der Haidingerschen Lupe, einem einfachen Kalkspatkristall von geeigneter Länge, vor dem sich eine der Länge des Kristalls entsprechende Blende befindet. Sie bildet den einfachsten Fall eines Polariskops, indem die durch die Doppelbrechung innerhalb des Kalkspats verdoppelt erscheinende Blendenöffnung bei Einfall teilweise oder vollständig linear polarisierten Lichtes in den Teilbildern beim Drehen verschiedene Helligkeit zeigt. Kalkspat (islandischer Doppelspat) ist einachsigt und besitzt eine ziemlich starke Doppelbrechung, wie die folgende Tabelle der Brechungsindizes erkennen läßt

Tabelle 1 Brechungsindizes für Kalkspat bei 15°

Wellenlänge	Ordentl. Strahl $n_1 = n_2$	Außerordentl. Strahl n_3	Wellenlänge	Ordentl. Strahl $n_1 = n_2$	Außerordentl. Strahl n_3
656,3	1,65440	1,48457	486,1	1,66783	1,49074
589,3	1,65836	1,48639	434,1	1,67552	1,49424
527,0	1,66341	1,48871	396,2	1,68330	1,49777

Aus der Gleichung des FRESNELSchen Ellipsoids für den hier in Betracht kommenden Fall einachsiger Kristalle findet man leicht die Gleichung der Strahlenfläche in der Form

$$(x^2 + y^2 + z^2) \left(\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_3^2} \right) - \frac{1}{n_1^2} \left(\frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_3^2} \right) (x^2 + y^2) - \frac{2}{n_1^2 n_3^2} z^2 + \frac{1}{n_1^4 n_3^2} = 0$$

und für ihre Schnitte in den Koordinatenebenen

$$\left. \begin{aligned} XY \quad & \left(x^2 + y^2 - \frac{1}{n_1^2} \right) \left(x^2 + y^2 - \frac{1}{n_3^2} \right) = 0, \\ YZ \quad & \left(y^2 + z^2 - \frac{1}{n_1^2} \right) (y^2 n_3^2 + z^2 n_1^2 - 1) = 0, \\ ZX \quad & \left(x^2 + z^2 - \frac{1}{n_1^2} \right) (x^2 n_3^2 + z^2 n_1^2 - 1) = 0, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

woraus sich ergibt, daß diese in der Ebene XY Kreise mit den Radien $1/n_1$ und $1/n_3$ sind, in den beiden anderen Ebenen hingegen je ein Kreis mit dem Radius $1/n_1$ und eine Ellipse, deren Halbachsen $1/n_1$ und $1/n_3$ sind.

Nach den Ausführungen auf S. 9 müssen also Lichtstrahl und zugehörige Wellennormale stets in einer die Achse Z enthaltenden Ebene liegen, und der Winkel zwischen Strahl und Normale ist (Abb. 5)

$$\operatorname{tg} \chi = \frac{\operatorname{tg} \varphi (n_1^2 - n_3^2)}{n_3^2 + n_1^2 \operatorname{tg}^2 \varphi}, \quad (19a)$$

woraus für den Großwert folgt

$$\operatorname{tg} \chi_{\max} = \frac{n_1^2 - n_3^2}{2n_1 n_3}$$

Daher wird wenigstens ein Lichtweg von

$$s = \frac{u}{\operatorname{tg} \chi}$$

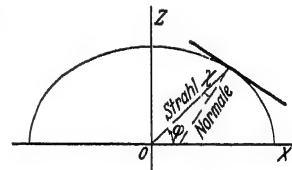


Abb. 5 Strahl und Normale bei der Strahlenfläche

erforderlich sein, um bei einem Blendendurchmesser u eine vollkommene Trennung der austretenden Lichtbündel zu erzielen, was bei Kalkspat gemäß den angegebenen Brechungszahlen etwa einem Verhältnis $s : u = 10 : 1$ entspricht. Bedeutend günstiger hinsichtlich der optischen Wirkung, vor allem bei nicht

streng parallelem Licht, ist die Beseitigung eines der Bündel durch Reflexion, die meisten der als Polarisationsprismen bezeichneten Einrichtungen beruhen auf diesem Verfahren. Durch Aufschneiden eines Kalkspatstückes und nachtragliches Verkitten beider Teilstücke mit einem Kitt von passendem Brechungsindex gelingt es, eine der Komponenten innerhalb eines begrenzten Winkelgebietes aus dem Strahlengang zu entfernen. Bei der ursprünglichen, von NICOL angegebenen Form wird ein Kalkspatstück verwendet, dessen Endflächen zunächst unter einem Winkel von 68° zu den Endflächen abgeschnitten werden,

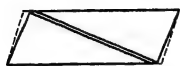


Abb 6 Schnitt durch ein Nicol-sches Prisma

während der natürliche Winkel 71° beträgt (Abb 6). Senkrecht zu den neuen Endflächen führt man einen Schnitt und kittet nach dem Polieren der Schnittflächen die Teile mit Kanadabalsam zusammen, dessen Brechungsindex zwischen den Hauptbrechungsindizes des Kalkspats liegt, so daß der Kitt für eine der im Kristall verlaufenden Wellen kleiner,

für die andere größer ist als derjenige im Kristall und demgemäß in einem Falle totale Reflexion eintreten kann.

Die Bedingungen, die an ein solches Prisma zu stellen sind, lassen sich wie folgt zusammenfassen (Abb 7).

1. Das Winkelgebiet, in dem linearpolarisiertes Licht austritt, muß in seiner Größe dem Anwendungszweck angepaßt sein, man fordert für allgemeine Zwecke wenigstens 20° bis 25° . Ferner muß dieses Gebiet symmetrisch zum Mittelstrahl sein, damit bei Drehung dieses Prismas möglichst der ganze Bereich ausgenutzt werden kann.

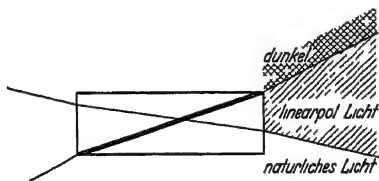


Abb 7 Grenzen des polarisierten Gesichtsfeldes bei einem Polarisationsprisma

2. Der Mittelstrahl soll ohne Seitenverschiebung austreten, damit bei Benutzung im konvergenten Strahlengang kein Schlagen des Bildes eintritt.

3. Die Polarisations Ebenen aller innerhalb des linearpolarisierten Gebietes verlaufenden Strahlen sollen einander parallel sein (normales Feld).

Die Größe des in der ersten Forderung erwähnten Winkelgebietes ist abhängig von den Hauptbrechungsindizes des Kalkspats, der Brechungszahl des Kittes n_k , der Größe des Schnittwinkels und der Lage der optischen Achse des Kristalls zur totalreflektierenden Schnittfläche. Das größte für sichtbares Licht erreichbare Gesichtsfeld ist für Kalkspat 42° und erfordert einen Kittindex von 1,486 (eingedicktes Leinol). Für symmetrisches Gesichtsfeld ist, wenn die optische Achse senkrecht zur Einfallsebene der Schnittfläche liegt, die Größe J desselben gegeben durch

$$\sin \frac{J}{2} = \frac{n_k (\sqrt{n_1^2 - n_k^2} - \sqrt{n_3^2 - n_k^2})}{\sqrt{2n_k^2 + n_1^2 + n_3^2 + 2\sqrt{(n_1^2 - n_k^2)(n_3^2 - n_k^2)}}}, \quad (20)$$

also in erster Linie abhängig von dem Unterschied der Brechungszahlen n_1 und n_2 . Daher sind für diesen Zweck nur Kristalle von starker Doppelbrechung verwendbar, da die Doppelbrechung mit abnehmender Wellenlänge zunimmt, sind für das Gebiet des Ultraviolett auch Kristalle von geringerer Doppelbrechung im Sichtbaren geeignet (Quarz).

Um der Bedingung 2 zu genügen, müssen die Endflächen senkrecht zum Hauptstrahl liegen, die optische Achse ebenso, und zwar am besten senkrecht oder parallel zur brechenden Kante der Einzelprismen, da sonst für geneigte Strahlen Unsymmetrie eintritt.

Bedingung 3 ist, wie BEREK¹ und GROOSMULLER² gezeigt haben, streng nie erfüllbar, so daß niemals eine in bezug auf Intensität gleichmäßige Ausleuchtung des Gesichtsfeldes erwartet werden kann. Am günstigsten verhalten sich in dieser Beziehung diejenigen Formen, die auch aus Bedingung 2 sich ableiten lassen.

Es ist verständlich, daß entsprechend der Zahl der veränderlichen Elemente eine große Zahl verschiedener Prismenformen existiert, die noch dadurch anwächst, daß weitere Forderungen gestellt werden, die sich auf Verwendbarkeit im Ultrarot oder Ultraviolett, gegebenenfalls auch auf die Ausnutzung beider Bündel oder die Möglichkeit der Verbindung mit anderen Einrichtungen, wie etwa dem Prisma eines Spektralapparates, beziehen³.

Trennung der linear polarisierten Teilbündel durch Brechung wird benutzt bei den Prismen nach SÉNARMONT, ROCHON und WOLLASTON⁴, die aus Kalkspat (oder Quarz) hergestellt werden. Sie bestehen aus zwei brechenden Prismen von gleichem brechenden Winkel, in denen jedoch die Lage der optischen Achsen verschieden ist (Abb 8). Zur Berechnung des Strahlenganges genügen die für die Hauptschnitte geltenden Formeln (19). Für kleine brechenden Winkel ist der Divergenzwinkel der Teilwellen dem brechenden Winkel proportional und für die beiden ersten Formen $\Delta = (n_3 - n_1) \varphi$, für die letzte Form doppelt so groß. Große Brechungswinkel kommen nicht in Frage, weil mindestens eines der Bündel eine starke Abhängigkeit von der Wellenlänge zeigt, das zugehörige Bild also farbig erscheint. Daher werden solche Doppelbildprismen vorwiegend als einfache Mikrometer benutzt an Stelle von Fadenmikrometern oder Heliometern (WELLMANN'S Mikrometer zur Beobachtung von Doppelsternen).

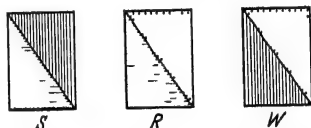


Abb 8 Lage der Kristallachsen bei den Prismen nach SÉNARMONT (S), ROCHON (R) und WOLLASTON (W)

Die Anwendung von Reflexion und Brechung zur Trennung der in einem Kristall entstehenden Teilwellen findet man bei den Prismen nach DOVE und GROSSE⁵.

Bei pleochroitischen Kristallen läßt sich die Verschiedenheit der Absorption für die im Kristall sich ausbreitenden Wellen benutzen, um eine von ihnen auszuschalten. Die gleichzeitig auftretende Färbung ist nur bei photometrischen Arbeiten störend, für einfache Polarisationsrichtungen aber sind, namentlich wenn gleichzeitig eine Schwächung erforderlich ist, Turmalinplatten als Polarisatoren oder Analysatoren angebracht.

5 Doppelbrechung in isotropen Medien durch mechanische und thermische Einflüsse Einfach brechende Körper werden doppelbrechend, wenn sie deformiert werden, gleichgültig, ob diese Deformationen durch einseitige mechanische Beanspruchung oder durch Temperaturdifferenzen im Innern des Körpers bedingt sind, da letztere wegen des im allgemeinen endlich großen Ausdehnungskoeffizienten innere Spannungen verursachen, die eine Deformation der Volumenelemente verursachen. Jedes Einzelelement läßt sich daher in seinem optischen Verhalten als Kristall auffassen, dessen Brechungsexponenten (oder Hauptlichtgeschwindigkeiten) Funktionen der Deformationen und damit auch der inneren Spannungen oder der Temperaturgradienten sind.

¹ Verh d Dtsch Phys Ges 21, S 338 (1919)

² Zf Instr 46, S 563 (1926)

³ B HATTE, Handbuch der prakt Optik 3 Aufl Berlin-Nikolassee 1928

⁴ Dr SÉNARMONT, Ann Chim Phys (3) 50, S 480 (1857), ROCHON, Nova Acta Acad Petropol IV (1853), WOLLASTON, Phil Trans 1820, S 126

⁵ Die gebräuchlichen Polarisationsprismen Klausthal 1889

BREWSTER und FRESNEL haben diese Beziehungen experimentell untersucht, NEUMANN¹ hat als erster eine Theorie dieser Erscheinungen aufgestellt, wobei er die Anschauungen der Undulationstheorie zugrunde legte. Nach ihm sind die Hauptlichtgeschwindigkeiten V_1, V_2, V_3 in einem Volumelement gegeben durch

$$V_1 = +q\sigma_x + p\sigma_y + p\sigma_z,$$

$$V_2 = +p\sigma_x + q\sigma_y + p\sigma_z,$$

$$V_3 = +p\sigma_x + p\sigma_y + q\sigma_z,$$

wobei p und q Körperkonstanten sind, die von Wellenlänge und Temperatur abhängig sind. Die Deformationsgrößen $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ müssen dabei als so klein angenommen werden, daß ihre zweiten Potenzen gegenüber den ersten vernachlässigt werden können. Hieraus folgt dann, daß die beiden Teilwellen mit verschiedener Geschwindigkeit, aber in gleicher Richtung sich fortpflanzen, und außerdem, daß Hauptdruckachsen und optische Achsen für jedes Element zusammenfallen. Aus dem System der Hauptdilatationen ergibt sich also eindeutig die Lage der optischen Symmetrieachsen, ebenso folgen die Werte der Hauptlichtgeschwindigkeiten als stetige Funktionen des Ortes.

Für den einfachen Fall einer homogenen Deformation ist also die Richtung der optischen Achsen aller Elemente dieselbe, und ein solcher Körper verhält sich wie ein einheitlicher Kristall, dessen Doppelbrechung jedoch durch die Größe der Dilatationen bestimmt ist und somit innerhalb gewisser Grenzen willkürlich verändert werden kann. Die Differenz der Hauptbrechungsindizes ergibt sich in diesem Falle zu

$$n_x - n_y = \frac{n(p - q)(1 + \mu)P}{FE},$$

worm n den Wert des Brechungsindex für den unbeanspruchten Körper, E den Elastizitätsmodul, μ die Querkontraktion, P die außen am Körper angreifende Druck- oder Zugkraft bedeutet. Bei Kenntnis von $p - q$ ist also für einen Glasstreifen von gegebenem Querschnitt F die Doppelbrechung durch die Änderung von P in einfacher Weise einstellbar, und ein solcher Glasstreifen stellt einen besonders für die Untersuchung schwacher Doppelbrechungen geeigneten Kompensator dar.

Die Größe der Doppelbrechung, hervorgerufen durch einseitigen Druck oder Zug von 1 kg bei einem Querschnitt von 1 cm², ist nach Messungen von PÖCKELS, FILON, ADAMS und WILLIAMSON u. a.²

Tabelle 2 Doppelbrechung mechanisch beanspruchter Gläser

Glasart ³	10 ⁶ Doppelbrechung	Glasart ³	10 ⁶ Doppelbrechung
507/614	-4,23	616/370	-3,06
516/620	-2,79	621/361	-2,77
523/590	-2,52	645/341	-2,56
537/512	-2,66	655/330	-2,61
545/503	-3,70	680/317	-2,17
571/430	-2,87	717/295	-1,70
573/420	-3,13	751/276	-1,30
574/570	-2,75	756/270	-1,19
606/440	-3,03	963/197	+1,88
608/570	-2,10		

¹ Abh. d. Berl. Akad. d. Wiss. 1841 II, S. 1—254.

² Die Bezeichnungen der Glasarten sind diejenigen der Sendlinger Opt. Glaswerke. Die ersten drei Ziffern geben die ersten drei Dezimalen der Brechungszahl, die letzten drei den 10fachen Wert der reziproken relativen Dispersion.

³ Angabe der Literatur in den International Critical Tables, Glass II, Washington 1927 und EITEL, PIRANI, SCHEEL, Glastechnische Tabellen, Berlin 1931.

Bei ungleichmäßiger Beanspruchung ändert sich die Doppelbrechung mit dem Orte, und ihre Größe ist ein Maß für die mittlere Deformation der längs des Lichtweges befindlichen Elemente. Man kann also auf diesem Wege wenigstens eine zweidimensionale Darstellung der Spannungsverteilung erhalten, die benutzt worden ist, um den Einfluß der Kühlung auf die Anisotropie des optischen

Glas festzustellen, was besonders für die Herstellung langbrennweitiger Objektive von höchster Bedeutung ist. Nach WILSINGS Untersuchungen können¹ z. B. die Zonenfehler des Potsdamer 80 cm-Objektivs unmittelbar auf Doppelbrechungsfehler zurückgeführt werden, die etwa in der Größenordnung von einigen Einheiten der 5. Dezimale des Brechungsindex liegen. Daß solche leicht vorkommen können, ergibt sich schon aus den von CZAPSKI für ein stark gespanntes Glas gefundenen Werten der Brechungsexponentenänderung, die für die beiden Teilwellen mit $9,14 \cdot 10^{-5}$ und $4,68 \cdot 10^{-5}$ angegeben worden sind, ferner aus den Messungen von WRIGHT, der für eine Reihe von optischen Gläsern der Firmen Schott und Genossen, Parra-Mantois und Bausch und Lomb Gangunterschiede von 5 bis $50 \text{ m}\mu$ je cm Glasdicke feststellte, was einer Brechungsindexdifferenz von $5 \cdot 10^{-7}$ bis $5 \cdot 10^{-6}$ entspricht. Da nun die Werte der Konstanten p und q , aus denen die absoluten Änderungen der Brechungsexponenten ermittelt werden können, groß gegenüber ihrer Differenz sind, wie die folgenden Zahlen zeigen, so können jene selbst für den Fall der Gleichheit von p und q , der für schwere Flintgläser beobachtet worden ist, noch merkliche Beträge annehmen. BERNDT erhielt sogar beim Sendlinger Borosilikatkron 516/640 durch Kühlung eine Ände-

Tabelle 3 Elastisch-optisches Verhalten der Gläser

Brechungsindex n	1,5123	1,5075	1,5452	1,5700	1,6440	1,7510	1,9625
Elastizitätsmodul	7940	4800	5470	6100	5470	5500	5035
Querkontraktion	0,187	0,274	0,250	0,222	0,224	0,239	0,26
p	0,178	0,182	0,187	0,195	0,204	0,202	0,218
q	0,097	0,110	0,118	0,135	0,160	0,182	0,237
$(n_3 - n)/(n_3 - n_1)$	0,32	0,115	0,285	0,655	0,26	3,48	-4,95
$(n_1 - n)/(n_3 - n_1)$	1,32	1,115	1,285	1,655	2,26	4,48	-3,95

rung des Brechungsindex von 0,0034, wobei freilich zu beachten ist, daß diese Änderungen nicht allein auf innere Spannungen zurückzuführen sind, sondern größtenteils auf Strukturänderungen hindeuten, auf konstitutive Umlagerungen der Moleküle. Aber selbst bei gut gekühlten Gläsern, für die bei hinreichend langer Kühlzeit endgültige nur durch die Zusammensetzung des Glases bestimmte Werte auftreten, können schon merkliche Doppelbrechungen durch das Eigengewicht erzielt werden, wenn die Auflagefläche klein ist (ZSCHIMMER²), demgemäß muß namentlich bei großen Objektiven mit entsprechend großem Eigengewicht auf eine möglichst druckfreie Lagerung geachtet werden.

Unter der Voraussetzung, daß auch in einem kleinen deformierten Kristallelement die FRESNELSchen Gesetze gelten und daß, wie bei den isotropen Körpern, die durch mechanische Beanspruchung entstehenden Änderungen der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten lineare Funktionen der Druckkomponenten und damit auch der Deformationen sind, können für Kristalle ähnliche Beziehungen aufgestellt werden, wie sie von NEUMANN für isotrope Körper abgeleitet worden sind. PÖCKELS hat gezeigt, daß für den allgemeinen Fall trikliner Kristalle 36 Konstanten auftreten, die selbst durch eine Transformation auf das Polarisationshauptachsensystem sich nicht an Zahl verringern lassen, mit zunehmender Symmetrie nimmt die Zahl der Konstanten ab, um beim regulären System die Zahl 3 zu erreichen. Die Lage der Polarisationshauptachsen ist dabei lediglich eine Funktion der Druckrichtungen, aber unabhängig von der Größe der Spannungen, die das Achsenverhältnis des FRESNELSchen Ellipsoids bestimmen.

Die mechanisch bedingten Doppelbrechungserscheinungen können wenigstens einen Teil der bei natürlichen oder künstlich hergestellten Kristallen auftretenden

¹ Zf Instrk 34, S. 341 (1914)² Zf Instrk 33, S. 376 (1913)

Anomalien erklären Bei den optisch viel verwendeten regulären Kristallen Steinsalz, Sylvin und Flußspat finden sich oft Stellen von starkerer Doppelbrechung, die meist auf Druckwirkungen zurückgeführt werden Teilweise sind jedoch die Wirkungen so stark, daß auch andere Ursachen wirksam sein müssen, wobei als eine derselben die mehr oder minder regelmäßige Einlagerung kleiner Partikelchen in Betracht kommen kann BRAUNS und WIENER¹ haben nachgewiesen, daß bei Mischungen isotroper Körper dann Doppelbrechung auftreten muß, wenn die Anordnung der Bestandteile eine gewisse Regelmäßigkeit aufweist Diese Art der Doppelbrechung, die im Gegensatz zur natürlichen als Formdoppelbrechung (Stabchen- und Plattendoppelbrechung, lamellare Doppelbrechung) bezeichnete Erscheinung verschwindet nur dann, wenn die Brechungsindizes der Komponenten gleich werden und auch die Absorption keine Unterschiede aufweist

Bei zylindrischen Einlagerungen vom Brechungsexponenten n_z in ein Medium vom Brechungsexponenten n_0 findet WIENER für ordentlichen und außerordentlichen Brechungsindex n_{ω} und n_e

$$n_{\omega} = n_0 \sqrt{\frac{(\delta_1 + 1)n_z^2 + \delta_2 n_0^2}{(\delta_1 + 1)n_0^2 + \delta_2 n_z^2}}, \quad n_e = \sqrt{\delta_1 n_z^2 + \delta_2 n_0^2}, \quad (21)$$

wenn δ_1 und δ_2 die relativen Volumina der Komponenten bedeuten und demgemäß $\delta_1 + \delta_2 = 1$ ist Für einen aus parallelen Platten bestehenden Mischkörper gilt

$$n_{\omega} = \sqrt{\delta_1 n_z + \delta_2 n_0}, \quad n_e = \frac{n_z n_0}{\sqrt{\delta_1 n_z^2 + \delta_2 n_0^2}} \quad (22)$$

Die Stabchendoppelbrechung ist also stets positiv, die Plattendoppelbrechung stets negativ Somit mußten auch isomorphe Mischkristalle sich wie negative einachsige verhalten, was aber nicht immer der Fall ist Wohl aber gibt die Theorie sehr gut das Verhalten von Zelloidin, Zellulose, Gelatine und anderer Kolloide wieder, aus denen leicht Modelle für die Untersuchung von Spannungserscheinungen hergestellt werden können, deren theoretische Behandlung wegen schwer formulierbarer Grenzbedingungen unsicher ist

Für die neuerdings empfohlenen Vinylderivate (Styrol) liegen noch keine Messungen vor, die eine abschließende Beurteilung erlauben POLLOPAS² ist wegen seiner starken zeitlichen Veränderlichkeit für exakte Untersuchungen nicht verwendbar

Die Erscheinungen der akzidentellen Doppelbrechung sind natürlich nicht auf feste Körper beschränkt Bei starkerer innerer Reibung gleichen sich auch in einer Flüssigkeit die Spannungen, die beispielsweise durch Bewegungen (schnelle Drehung eines festen Körpers in der Flüssigkeit) hervorgerufen werden, so langsam aus, daß noch eine merkliche Doppelbrechung auftreten kann, die sich durch entsprechende Richtungsänderung der Strahlen oder, bei Verwendung polarisierten Lichtes, durch Intensitätsschwankungen bemerkbar macht Die meist als Stromungsdoppelbrechung bezeichneten Erscheinungen müssen aber teilweise auch auf das Vorhandensein anisodiametrischer Teilchen zurückgeführt werden, also solcher Besonderheiten des molekularen Baues, die bei idealer, regelmäßiger Anordnung der Moleküle bereits zu natürlicher Doppelbrechung Veranlassung geben wurden Namentlich hochatomige organische Stoffe kommen hier in Betracht, während bei einfacher gebauten zähen Flüssigkeiten nicht der molekulare Bau, sondern die Kohäsionskräfte maßgebend sind, eine

¹ Abh Sachs Ges d Wiss math-phys Kl 32 (1912), vgl auch A FREY, Kolloidchem Beih 20, S 227 (1924)

² C PLONEIT, Glastechn Ber V, S 354 (1927/28)

strenge Unterscheidung beider Gruppen ist schwer möglich, da z B bei Temperatursteigerung, die im allgemeinen eine Verminderung der inneren Reibung bewirkt, auch die Rückkräfte, die eine regelmäßige Lagerung der Moleküle bewirken, abnehmen¹

6 Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit Die Erscheinungen der akzidentellen Doppelbrechung zeigen, daß die Voraussetzung vollkommener Homogenität eines Körpers nur selten zutrifft, entsprechend muß auch beachtet werden, daß die Beschaffenheit der Grenzflächen mindestens im optischen Sinne nicht den Annahmen entspricht, die bei der Aufstellung der Grenzbedingungen für den Übergang des Lichtes über die Grenze zweier Medien gemacht worden sind. Alle Grenzflächen zeigen eine mehr oder minder große Abweichung von der idealen, durch eine mathematische Beziehung gegebenen Form, nicht nur im Sinne einer Schichtung, einer gewissen Tiefenausdehnung, sondern vor allem in der Anordnung und Aneinanderreihung der einzelnen Elemente, wodurch naturgemäß Abweichungen von den vorher angegebenen Gesetzen bedingt werden. Als Grenzfälle sind zu betrachten einerseits gut polierte Flächen sowie kleinere Elemente natürlicher Bruch- oder Spaltungsflächen, andererseits rauhe Flächen, bei denen aber wenigstens noch die Gesamtform als regelmäßig zu betrachten ist. Für solche rauhe Flächen soll nach dem LAMBERTSchen Gesetz unabhängig von der Richtung der Einstrahlung die Rückstrahlung gleichmäßig nach allen Richtungen erfolgen, wobei noch bemerkt sein mag, daß eine einwandfreie theoretische Ableitung dieses Gesetzes bisher noch nicht gelungen ist.

POKROWSKI² hat empirisch einen verallgemeinerten Ausdruck abgeleitet, der für Flächen beliebiger Art sowohl den diffus als auch den an den einzelnen Elementen regelmäßig reflektierten Anteil berücksichtigt. Fällt Licht unter dem Winkel i (gerechnet vom Flächenlot) auf eine rauhe Fläche auf und betrachtet man die Rückstrahlung unter dem Winkel j , so soll die reflektierte Energie J_R gegeben sein durch

$$J_R = b \cos j + \frac{a}{2} F \left(\frac{i+j}{2}, i' \right), \quad (23)$$

wobei

$$\sin i' = \frac{\sin \left(\frac{i+j}{2} \right)}{n}$$

und F durch die FRESNELSchen Koeffizienten μ und σ bestimmt ist in der Form

$$F = \mu^2 + \sigma^2$$

Hierbei ist vorausgesetzt, daß die Anzahl der parallel zueinander liegenden spiegelnden Elemente vollkommen unabhängig von der Richtung sein soll, was nicht allgemein zutreffen dürfte. SCHULZ hat daher unter der Annahme, daß die Flächenelemente nach dem Wahrscheinlichkeitsgesetz verteilt sind, eine Erweiterung dieses Ausdrucks vorgenommen, indem für a noch eine Abhängigkeit von Einfallswinkel und Ausstrahlungswinkel angesetzt wird, so daß sich ergibt

$$a = c + d \cos j e^{-k(i-j)^2} \quad (23a)$$

Je größer also der Einfallswinkel ist, desto größer wird der Anteil regelmäßig reflektierten Lichtes, bis schließlich von einem bestimmten Winkel an, den JENINZSCH³ als Grenzwinkel der regulären Reflexion bezeichnet, sogar eine erkennbare Abbildung erfolgt. Die Größe des Grenzwinkels ist abhängig von der

¹ D. VORLANDER, Chemische Kristallographie d. Flüssigkeiten, Leipzig 1924.

² G. P. WORONKOF u. G. J. POKROWSKI, Zf. Phys. 30, S. 139 (1924).

³ Z. techn. Phys. 7, S. 310 (1926).

Wellenlänge und läßt sich unter Benutzung des RAYLEIGHschen Phasenwertes darstellen in der Form

$$\cos z = \frac{\lambda}{8h},$$

wenn man mit h den mittleren Abstand der einzelnen Flächenelemente in Richtung der Normalen bezeichnet

Nach JENTZSCH ist

Tabelle 4 Grenzwinkel der regulären Reflexion

λ	$90 - z$	$\frac{\cos z}{\lambda}$
656 m μ	21°,07	0,548
589 „	17°,48	0,538
486 „	14°,21	0,540

Einerseits bildet also die Größe $\frac{\cos z}{\lambda}$ ein Maß für die Güte der Flächen, andererseits kann man aus den Formeln Anhaltspunkte für das Verhalten diffus reflektierender Flächen in bezug auf die Polarisationswirkung gewinnen, um dann Rückschlüsse auf die Natur der reflektierenden Substanz zu ziehen, wie dies von SECCHI, LANDERER¹ u. a. geschehen ist, die festgestellt haben, daß das an der Oberfläche des Mondes und einiger Planeten reflektierte Licht Maxima der Polarisation hat, beim Mond liegt der Polarisationswinkel mit 56°,72 zwischen dem für Basalt, Trachyt und Andesit einerseits, Vitrophyr und Obsidian andererseits, während der Wert für Eis bedeutend abweicht

7. Polarisation bei Phosphoreszenz und Fluoreszenz Die Emission phosphoreszierender Stoffe ist, wie in mehreren Fällen festgestellt ist, polarisiert. Der Grund liegt teilweise in der Aufspaltung des Emissionslichtes in ein ordentliches und ein außerordentliches Spektrum, die auch verschiedene Intensitäten und verschiedene spektrale Verteilung haben, aber im wesentlichen unabhängig sind von dem Polarisationszustand des erregenden Lichtes, während bei organischen Stoffen in zähen Lösungsmitteln der Polarisationszustand des erregenden Lichtes denjenigen des emittierten Lichtes bestimmt. Der Polarisationsgrad ist in allen Richtungen senkrecht zum elektrischen Vektor des erregenden Lichtes der gleiche. Daß bei den einen ziemlich komplizierten Energieumwandlungsprozeß darstellenden Phosphoreszenzerscheinungen der Polarisationszustand des emittierten Lichtes wesentlich von Nebenbedingungen abhängig ist und der Polarisationsgrad nur dann von Null verschieden sein kann, wenn molekularer Bau oder molekulare Anordnung in ähnlicher Weise anisotrop ist wie bei Kristallen oder bei dem Fall der Stäbchen- oder Plattendoppelbrechung, zeigt einen deutlichen Gegensatz zu der als reine Resonanzstrahlung zu betrachtenden eigentlichen Fluoreszenz, bei der die aufgenommene Energie nach kurzer Verweilzeit wieder in Form von Strahlung derselben Wellenlänge emittiert wird. Bei geringer Dampfdichte tritt eine ziemlich starke Polarisation auf, die bei einfachen Molekülen und Erregung mit linearpolarisiertem Licht ebenfalls linear sein mußte, bei anisotrop gebundenen Elektronen theoretisch in der Richtung senkrecht zum elektrischen Vektor 33% betragen sollte, bei geringem Dampfdruck trifft dies mit guter Näherung zu. Bei zunehmendem Dampfdruck geht der Polarisationsgrad infolge mehrfacher Umwandlung auf Null zurück.

8. Zerstreuung des Lichtes an kleinen Körpern. Neben den intramolekularen Vorgängen, die eine Zerstreuung des Lichtes durch Bildung neuer Emissionszentren verursachen, tritt bei Vorhandensein sehr kleiner Körper noch eine

¹ K GRAFF, Grundriß der Astrophysik Leipzig u. Berlin 1928

Zerstreuung des Lichtes auf, die als Beugung des Lichtes betrachtet werden kann. Die zuerst von RAYLEIGH durchgeführte theoretische Behandlung hat gezeigt, daß kleine durchsichtige, in ihrem Brechungsindex nur wenig von dem des Grundmediums unterschiedene Teilchen eine sekundäre Strahlung erzeugen, deren Intensität umgekehrt proportional der vierten Potenz der Wellenlänge ist. Diese Streustrahlung, in der die kurzwelligen Bestandteile überwiegen müssen, wodurch die blaue Farbe des Himmelslichtes erklärt werden kann, ist polarisiert, und zwar sowohl im Falle linearer Polarisation der primären Welle als auch im Falle einfallenden natürlichen Lichtes¹.

Ist die einfallende Welle linear polarisiert, so sind der Polarisationsgrad und die Intensität des Streulichtes für alle Richtungen dieselben, die als Erzeugende eines Kegels angesehen werden können, dessen Achse die Schwingungsrichtung und dessen Spitze das beugende Volumenelement ist (Abb 9). Ist die primäre Welle natürliches Licht, so gilt dasselbe für die Kegel, deren Achse die Richtung des einfallenden Lichtbündels ist (Abb 10). Freilich ist im allgemeinen die sekundäre Welle auch dann nicht linear polarisiert, wenn der Öffnungswinkel der obenerwähnten Kegel gleich $2R$ ist, wie dies nach der einfachen RAYLEIGH'schen Theorie folgen würde. Auch bei einfachen Gasen muß eine molekulare Anisotropie angenommen werden, die zu einer „Depolarisation“ der sekundären Welle führt, deren Betrag durch das Verhältnis der schwächeren zur stärkeren Komponente des Streulichtes definiert werden kann. Ist erstere A_1 , letztere A_2 , so gilt, wenn

$$\varrho = \frac{A_1^2}{A_2^2},$$

für den Polarisationsgrad bei linear polarisiertem einfallendem Licht

$$\pi = \frac{(1 - \varrho) \sin^2 \gamma}{(1 + \varrho) - (1 - \varrho) \cos^2 \gamma} \quad (24)$$

und für natürliches einfallendes Licht

$$\pi = \frac{(1 - \varrho) \sin^2 \beta}{(1 + \varrho) + (1 - \varrho) \cos^2 \beta} \quad (25)$$

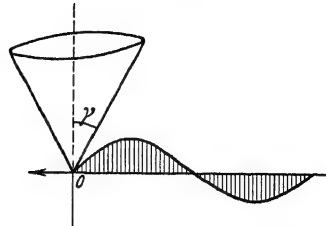


Abb 9 Kegel der Streustrahlung gleicher Intensität und gleichen Polarisationsgrades für linear polarisiertes Licht

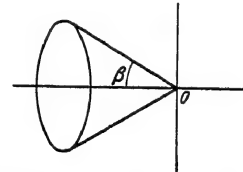


Abb 10 Kegel der Streustrahlung gleicher Intensität für natürliches Licht

Demgemäß mußte die stärkste Polarisation des Himmelslichtes in der zu den Sonnenstrahlen senkrechten Ebene zu beobachten sein, und der Polarisationsgrad mußte bei Annäherung und Entfernung von dieser Ebene abnehmen, um in unmittelbarer Nachbarschaft und im Gegenpunkte der Sonne Null zu werden. In Wirklichkeit wird aber der Polarisationszustand durch Mitwirkung zweifach oder mehrfach abgelenkten Lichtes sowie auch durch die Anwesenheit von Wassertropfchen, Staub und feiner durch elektromagnetische Vorgänge beeinflusst. Zur Erklärung der neutralen Punkte ist schon von SORÉ² sekundäre Streuung herangezogen worden, ein Weg, der noch von HURION³ und neuerdings von AHLGRIMM⁴ begangen worden ist. Die Übereinstimmung der so erhaltenen theoretischen Werte

¹ Die Lichtzerstreuung infolge der molekularen Rauigkeit der Trennungsfläche zweier durchsichtiger Medien behandelt R. GANS, Ann d Phys (4) 79, S 204 (1926). Allgemeine Grundlagen s. auch J. CABANNES, La Diffusion moléculaire de la Lumière, Paris, 1929.

² Ann Chim Phys (6) 14, S 503 (1888).

³ Ann Chim Phys (7) 7, S 456 (1896).

⁴ Inaug-Diss. Kiel 1915, s. auch M. SCHIRMANN, Met Z 37, S 12 (1920).

mit den Beobachtungswerten kann als befriedigend betrachtet werden, da sie die Existenz und die Lage der neutralen Punkte und auch den Verlauf der Polarisationsisoklinen nach Einführung der nach Beobachtungen ermittelten Zahlenwerte der Konstanten wiederzugeben gestattet, daß nicht vollkommene Übereinstimmung erwartet werden kann, geht schon daraus hervor, daß bei den bisherigen Ableitungen Ausdehnung und Schichtung der Atmosphäre ebensowenig streng berücksichtigt sind wie die Veränderlichkeit des Transmissionskoeffizienten und die Tatsache, daß auch mehrfach abgelenkte Strahlen die Polarisationsseigenschaften des Himmelslichtes bestimmen

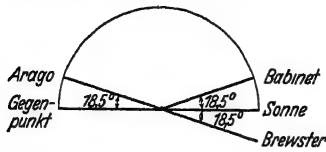


Abb 11 Lage der neutralen Punkte am Himmel

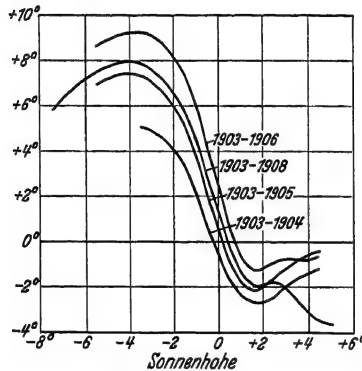


Abb 12a Differenzen der Jahresmittel für ARAGOS Punkt

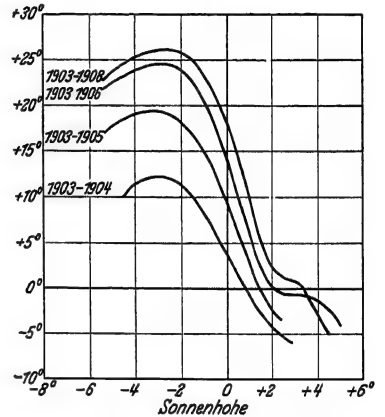


Abb 12b Differenzen der Jahresmittel für BABINET'S Punkt

Die Beobachtungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen. In der durch die Sonne gelegten Vertikalebene treten in einer Entfernung von normalerweise $18\frac{1}{2}^\circ$ von Sonne und Gegenpunkt der Sonne neutrale Punkte auf, die in der in Abb 11 angedeuteten Folge als BREWSTER'Scher, BABINET'scher und ARAGOScher Punkt bezeichnet werden.

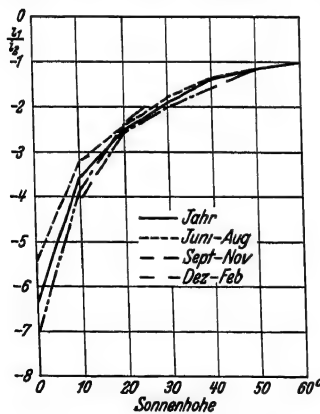


Abb 13 Änderung der Polarisationsgröße im Zenit, in Abhängigkeit von Sonnenstand und Jahreszeit

Die Beobachtungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen. In der durch die Sonne gelegten Vertikalebene treten in einer Entfernung von normalerweise $18\frac{1}{2}^\circ$ von Sonne und Gegenpunkt der Sonne neutrale Punkte auf, die in der in Abb 11 angedeuteten Folge als BREWSTER'Scher, BABINET'scher und ARAGOScher Punkt bezeichnet werden. Die Lage dieser Punkte ist abhängig von der Sonnenhöhe (Abb 12a, b), wird aber auch durch die Witterung, Wolken und Staub beeinflusst. Weitere sekundäre Punkte können außerhalb der genannten Ebene auftreten. Das Maximum der Polarisation liegt in etwa 90° Abstand von der Sonne, doch zeigen sich Schwankungen zwischen 88° und 92° , deren Ursachen die gleichen sein dürften wie diejenigen, die der Lagenänderung der neutralen Punkte zugrunde liegen.

Die Änderung der Polarisationsgröße mit der Sonnenentfernung wird meist durch die zeitliche Änderung der Polarisationsgröße im Zenit gemessen. Sie zeigt einen typischen, jedoch von der Jahreszeit abhängigen Verlauf (Abb 13), der absolute Wert wird durch das Wetter beeinflusst, und zwar deutet übernormale und zunehmende Polarisation auf ruhiges, niedrige Polarisation auf kommendes trübes Wetter.

Da in den neutralen Punkten Übergang von positiver zu negativer Polarisation stattfindet, ergibt sich damit für die außerhalb des Sonnenvertikals liegenden Punkte eine Drehung der Polarisationsebene, die BRFWSTER¹ und nach ihm BOSANQUET² formelmäßig darzustellen versuchten. Aus der von AHLGRIMM abgeleiteten Formel für die Polarisationsisoklinen läßt sich auch die Gestalt der BUSCHSchen Lemniskate ermitteln, die die Punkte verbindet, deren Polarisationssebene einen Winkel von 45° mit dem Sonnenvertikal bildet. Eine ausführliche Behandlung dieser Fragen findet sich in dem zusammenfassenden Werk von F. BUSCH und CHR. JENSEN³ sowie in der Arbeit von C. DORNO⁴.

Die gleichen Erscheinungen sind auch von KIMBALL⁵ am Nachthimmel beobachtet worden, bei Neumond sind keine Polarisationserscheinungen zu bemerken.

Auch bei anderen Himmelserscheinungen zeigt sich Polarisation, freilich ist sie meist durch Reflexionsvorgänge bedingt. RINNE und ROSCH⁶ haben unter Benutzung der FRESNELSchen Formeln das Intensitätsverhältnis der parallel und senkrecht zur Einfallsebene polarisierten Komponenten für Haupt- und Nebenregenbogen berechnet und gefunden, daß

für Bogen	1	2	3	4	5	6
I_{\parallel}/I_{\perp}	21	8,5	8,75	6,3	6,5	7,5

ist, also eine starke Polarisation vorhanden ist, die sich bei Beobachtung durch ein NICOLSches Prisma in einer zonenweisen Auslöschung des Regenbogens auswirkt.

9 Erkennung und Messung der Schwingungsrichtung und des Polarisationsgrades Bei merklichem Polarisationsgrad ist der Nachweis des Vorhandenseins polarisierten Lichtes bereits bei Verwendung einer einfachen polarisierenden Vorrichtung, also eines Polarisationsprismas oder einer Turmalinplatte möglich, da bei Drehung um die Schwingungsrichtung als Achse Helligkeitsschwankungen auftreten. Ist ferner die Schwingungsrichtung des durch den Analysator hindurchgehenden Lichtes bekannt — sie kann gegebenenfalls unter Benutzung einer reflektierenden Fläche bei Beobachtung unter dem Polarisationswinkel leicht ermittelt werden —, so ist auch bei Einstellung auf größte Helligkeit die Schwingungsrichtung der polarisierten Komponente des einfallenden Lichtes gegeben. Besser ist es, wenn man für die Beobachtung statt der zeitlich aufeinanderfolgenden Einstellung auf größte und kleinste Intensität eine Vorrichtung benutzt, bei der als Kriterium gleiche Helligkeit zweier mit möglichst scharfer Trennungslinie aneinanderstoßender Flächen dient, wie dies bei der HAIDINGERSchen Lupe der Fall ist. Sie besteht aus einem Kalkspatstab mit vorgesetzter Blende, welche letztere, mit einer Lupe durch den Kristall hindurch beobachtet, verdoppelt erscheint. Bei richtig gewählter Größe der Blende, die durch die Länge des Kalkspatstabes bestimmt ist, stoßen beide Blendenbilder in scharfer Grenze zusammen. Da die die Blendenbilder erzeugenden Bündel senkrecht zueinander polarisiert sind, kann bei Vorhandensein teilweise polarisierten Lichtes Helligkeitsgleichheit nur auftreten, wenn die Schwingungsrichtungen der Bündel unter 45° zur Schwingungsrichtung der polarisierten Komponente stehen.

¹ Phil Mag (4) 30 (1865)

² Phil Mag (4) 50, S. 497 (1880), s. auch R. RUBENSON, *Mémoire sur la polarisation de la lumière atmosphérique* Upsala 1864

³ Tatsachen und Theorien der atmosphärischen Polarisation Hamburg 1910, s. auch CHR. JENSEN, *Met Z* 49, S. 419 (1932), *Gerlands Beitr* 35, S. 161 (1932), A. SINJAGIN, ebenda 38, S. 68 (1933), W. SMOLARSKI, ebenda 38, S. 97 (1933)

⁴ *Himmelselligkeit, Himmelspolarisation und Sonnenintensität* Berlin 1919

⁵ *Monthly Weather Rev* 31, S. 320 (1903), 33, S. 100 (1905), s. auch DULAY, *J. d. Phys.* (6) 10, S. 219 (1929)

⁶ *Centrbl. f. Min* 1927, Abt. A, Nr. 2, S. 33, G. B. DEODHAR, *Nature* 114, S. 860 (1924)

Die gleiche Wirkung kann erzielt werden bei Benutzung von Prismen nach WOLLASTON, ROCHON oder SENARMONT Auch das CORNUSche Photopolarimeter, im wesentlichen aus einem Doppelbildprisma mit folgendem Analysator bestehend, ist zu diesen Vorrichtungen zu zählen

Diese Methode gibt sehr unsichere Resultate oder versagt gänzlich, wenn der Polarisationsgrad klein ist Schon beim Polarisationsgrad 0,1 wurde, um eine merkbare Helligkeitsdifferenz der Felder zu erzielen, eine Drehung von $\pm 3^\circ$ erforderlich sein Daher sind, um in solchen Fällen Polarisationsgrad und Polarisationsrichtung zu bestimmen, besondere Polariscope erforderlich, bei denen meist von der SAVARTschen Platte Gebrauch gemacht wird

Die Theorie der Interferenzen, die bei Kombinationen von Kristallplatten auftreten, ist eingehend von MASCART¹ behandelt worden Bei Beschränkung auf Strahlen, die mit der Normale der Platten kleine Winkel bilden, und unter der Voraussetzung geringer Doppelbrechung lassen sich die beim SAVARTschen Polariscope auftretenden Interferenzstreifen in einfacher Weise berechnen Legt man zunächst eine beliebige Kristallplatte zugrunde (Abb 14), so wird ein einfallender Strahl AB innerhalb der Platte in zwei Wellen zerlegt, deren Normalen BC und BE die Winkel r_1 und r_2 mit der Plattennormalen bilden mögen Die Wellennormalen nach dem Austritt sind dann CD und EF Damit ergibt sich für den Gangunterschied Γ , wenn CG senkrecht zu EF ist,

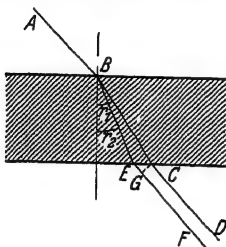


Abb 14 Durchgang eines Strahles durch eine Kristallplatte

$$\Gamma = \frac{BE}{\lambda_2} + \frac{EG}{\lambda_0} - \frac{BC}{\lambda_1},$$

was nach einfacher Umformung und Einführung der Wellenlänge λ_0 in Luft an Stelle der Wellenlängen λ_1 und λ_2 im Kristall ergibt

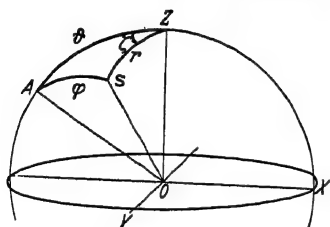


Abb 15 Sphärisches Dreieck Wellennormale - Kristallachse - Plattennormale

$$\Gamma = \frac{d}{\lambda_0} (n_2 \cos r_2 - n_1 \cos r_1)$$

Unter den oben angegebenen Voraussetzungen erhält man dann bei Einführung eines mittleren Winkels r_m

$$\Gamma = \frac{d(n_2 - n_1)}{\lambda_0 \cos r_m}$$

und schließlich, wenn φ den Winkel zwischen Wellennormale im Kristall und Kristallachse bezeichnet,

$$\Gamma = \frac{n d \sin^2 \varphi}{\cos r_m} \quad (26)$$

Ist nun eine Kristallplatte von der Dicke D in der XY -Ebene gegeben, stellt also OZ die Plattennormale dar, und ist OA (Abb 15) die Richtung der Kristallachse, OS die Richtung der Wellennormale im Kristall, so folgt aus dem sphärischen Dreieck ASZ

$$\cos \varphi = \cos \theta \cos r + \sin \theta \sin r \cos \zeta$$

Für die Kurven gleichen Gangunterschiedes wird dann, wenn man nach Potenzen von $\sin r$ entwickelt und nur Glieder zweiter Ordnung berücksichtigt,

$$\frac{\Gamma}{n d} = \sin^2 \theta + \sin^2 r \left\{ \frac{1}{2} \sin^2 \theta + \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \cos^2 \zeta \right\} - \sin r \cos \zeta \sin 2 \theta \quad (27)$$

Während nun bei Einfall natürlichen Lichtes die beiden innerhalb des Kristalls verlaufenden Wellen als inkohärent zu betrachten sind, daher auch bei Zurück-

¹ Traité d'Optique 2 (1899)

führung auf eine Schwingungsrichtung durch einen folgenden Analysator nur die additiven Wirkungen ergeben, können bei Verwendung homogenen Lichtes Interferenzen sichtbar werden, deren Form je nach der Lage der Achse, also des Winkels ϑ , sich ändert, aber immer als Kegelschnitt angesehen werden kann. Im weißen Licht sind die Interferenzen nur bei sehr dünnen Platten sichtbar, weil bereits im Minimum der Gangunterschied mehrere Wellenlängen beträgt.

Setzt man aber, wie bei der SAVARTschen Kombination, zwei Platten gleicher Dicke mit gleicher Achsenlänge so hintereinander, daß die Hauptschnitte senkrecht aufeinander stehen, dann folgt, da das Azimut für die zweite Platte somit um 90° gedreht ist, als Gesamtgangunterschied die Differenz der durch die einzelnen Platten bedingten Gangunterschiede und damit

$$\frac{\Gamma}{\pi d} = \sin^2 \vartheta \sin^2 \gamma (\sin^2 \zeta - \cos^2 \zeta) - \sin 2\vartheta \sin \gamma (\cos \zeta - \sin \zeta) \quad (28)$$

Bei Einführung rechtwinkliger Koordinaten ist ersichtlich, daß die Kurven gleichen Gangunterschiedes und somit auch die Kurven gleicher Intensität (Farbe) gleichzeitige Hyperbeln sind, deren Asymptoten den Winkel zwischen den Hauptschnitten der Platten halbieren und deren Mittelpunkt bei einigermaßen großer Neigung der Kristallachse gegen die Plattenebene stark exzentrisch liegt. Die Exzentrizität ist gegeben durch $\operatorname{ctg} \vartheta$. Der Gesamtgangunterschied für senkrecht durch die Plattenkombination gehende Strahlen ist Null, ebenso für alle Punkte der Asymptote, die also hell erscheint, wenn die Schwingungsrichtungen des einfallenden Lichtes und des auf die Plattenkombination folgenden Analysators parallel sind, dunkel auch im weißen Licht, wenn die genannten Schwingungsrichtungen gekreuzt sind.

Das aus gekreuzten Platten und Analysator bestehende SAVARTsche Polarisoskop erlaubt, da sich die durch den polarisierten Anteil des einfallenden Lichtes erzeugten Streifen dem durch den unpolarisierten Anteil gegebenen hellen Grunde überlagern und daher schon bei geringem Polarisationsgrad sichtbar werden, eine einfache Bestimmung von Polarisationsrichtung und Polarisationsgrad. Es ist namentlich zur Beobachtung des Polarisationszustandes leuchtender oder beleuchteter Flächen benutzt worden, bei denen der Polarisationszustand des emittierten oder reflektierten Lichtes von Ort zu Ort sich ändert, wie etwa beim Himmelslicht oder bei den Oberflächen der Planeten.

LYOT¹ hat die Empfindlichkeit des SAVARTschen Polarisokops durch zwei Abänderungen erhöht. Zunächst läßt sich die Erkennbarkeit der Streifen dadurch steigern, daß die beiden Streifensysteme, die durch Drehung des Analysators um 90° erhalten werden, also einerseits dasjenige mit hellem Mittelstreifen, andererseits dasjenige mit dunklem Mittelstreifen, die gleichzeitig auftreten, wenn an Stelle des Analysators ein Doppelbildprisma nach WOLLASTON oder eine ähnliche Konstruktion verwendet wird, überlagert werden. Dies tritt ein, wenn die beiden durch das Doppelbildprisma erzeugten Teilbilder um die halbe Breite der Interferenzstreifen verschoben sind. Die von LYOT besonders für Planetenbeobachtung benutzte Anordnung besteht aus einer SAVART-Platte, deren aus Kalkspat hergestellte Einzelplatten 1,4 mm dick sind und somit ein Streifensystem von $10'$ Breite im gelben Licht ergeben, und einem Doppelbildprisma aus Glas und Kalkspat, wobei letzteres, aus einem Spaltstück hergestellt, einen Winkel von $56'$ aufweist. Ist auf diese Weise der Kontrast der Streifen bereits verdoppelt, so läßt sich eine weitere Empfindlichkeitssteigerung dadurch erzielen, daß mittels einer vorgeschalteten Platte, die gegen die Schrichtung

¹ Rev d'Opt 5, S 108 (1926), Ann de l'Obs de Paris 8, S 1 (1929)

meßbar geneigt werden kann, ein bestimmter Prozentsatz polarisierten Lichtes zugefügt wird, durch den der Kontrast noch weiter gesteigert werden kann.

Schon von ARAGO ist mit Hilfe eines einfachen Doppelbildprismas mit vorgesetzter Quarzplatte festgestellt worden, daß das vom Monde reflektierte Licht merklich polarisiert ist, was von SECCHI bestätigt wurde, desgleichen von ROSSE (1877) und LANDERER (1889). Von letzterem ist der Polarisationswinkel, der hier nicht als Winkel zwischen Strahl und Einfallslot, sondern als Winkel zwischen Strahl und reflektierender Fläche gemessen wird, mit $33^\circ 17'$ angegeben worden, dies läßt darauf schließen, daß die Mondoberfläche aus korniger Lava oder Asche besteht, wenigstens in den Maren, die stärkste Polarisation zeigen. Der Vergleich mit dem Verhalten irdischer Substanzen, deren Polarisationswinkel in gleicher Weise gemessen, wie oben erwähnt, durch folgende Tabelle gegeben ist, gibt als Substanz mit nahezu gleichem Polarisationswinkel Vitrophyr

Polarisationswinkel von Gesteinen, gemessen als Winkel zwischen Strahl und Reflexionsebene¹

Basalt	$31^\circ 43'$
Trachyt	$32^\circ 16'$
Andesit	$32^\circ 50'$
Vitrophyr	$33^\circ 18'$
Obsidian	$33^\circ 46'$
Eis	$37^\circ 20'$

Auch die folgenden Messungen haben ähnliche Ergebnisse gehabt. SALEI weist freilich darauf hin, daß der Polarisationswinkel nicht nur von der Gesteinsart, sondern auch von der Oberflächenbeschaffenheit, vom Politurgrad abhängig ist. BARABASCHEFF², der ebenfalls, wie die meisten seiner Vorgänger, mit einem CORNUSCHEN Photopolarimeter gearbeitet hat, macht nähere Angaben über den Polarisationsgrad, der nach ihm für die Mare 47,2%, für die Landgebiete 17% betragen soll.

Ähnliches Verhalten zeigen die Planeten. Während die früheren Messungen nur unsichere Ergebnisse zeigten und allein ROSSE für die Venus eine merkliche Polarisation im Betrage von 3,9% nachweisen konnte, geben die neueren Untersuchungen ziemlich starke Polarisation beim Merkur (Polarisationsgrad 0,175) und bei der Venus, bei der die Beobachtungen wegen der größeren Sonnenentfernung günstiger sind, einen deutlichen Wechsel der Polarisationsebene mit dem Sehwinkel, der aus geozentrischen und heliozentrischen Breiten β , β' und Längen λ , λ' sich in der Form

$$\cos V = \sin \beta \sin \beta' + \cos \beta \cos \beta' \cos(\lambda - \lambda') \quad (29)$$

ergibt oder bei kleinen Werten der Winkel

$$V^2 = (\beta - \beta')^2 + (\lambda - \lambda')^2 \quad (29a)$$

Der Polarisationsgrad ist positiv für Sehwinkel zwischen 7° und 24° , negativ für solche zwischen 24° und 147° . Mars zeigt im allgemeinen denselben Verlauf wie der Mond, doch zeigen sich besondere Erscheinungen am Rande, Einfluß der Wolken ergibt Abschwächung der Polarisation. Jupiter weist eine von Zone zu Zone wechselnde schwache Polarisation auf, die aber an den Polkalotten erheblich anwächst. Starke Polarisation der Kalotten ist auch beim Saturn nachgewiesen ($P = 0,077$ bis $0,086$), in den mittleren Zonen sind Zeichenwechsel vorhanden, an den Rändern Anomalien. Der Ring ist schwach negativ polarisiert.

Für vergleichende Laboratoriumsversuche sind Anordnungen (Abb 16) benutzt worden, bei denen besonders darauf geachtet werden mußte, daß der

¹ B LYOT, l c S 61

² A N 229, Nr 5473, S 7 (1926)

polarisierende Einfluß der Kondensorlinsen und der Prismen ausgeschaltet wird, zu diesem Zwecke empfiehlt sich die Einschaltung einer genügend dicken depolarisierenden Kristallplatte. Untersuchungen solcher Art gehen bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts zurück.¹

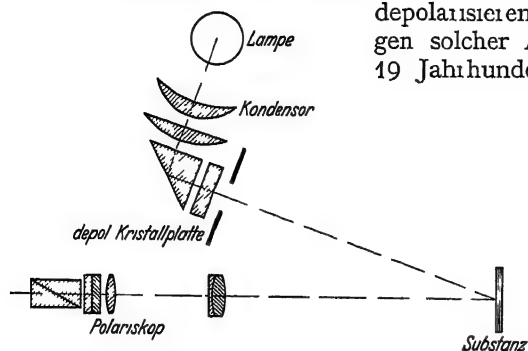


Abb 16 Anordnung zur Messung des Polarisationsgrades des von diffus reflektierenden Flächen zurückgeworfenen Lichtes

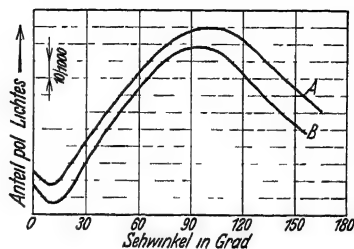


Abb 16a Anteil polarisierten Lichtes nach Reflexion an einer Aschenmischung (A) im Vergleich zur mittleren Mondkurve (B)

Die Ergebnisse einer solchen Vergleichsmessung zeigt Abb 16a. Als Abszissen sind die Winkel, als Ordinaten die Anteile polarisierten Lichtes aufgetragen. A gibt die für eine Aschenmischung vom Albedo 0,13 geltenden Werte, B die mittlere Mondkurve.

10 Photometrische Anordnungen² Die einfache Regulierbarkeit der Intensität bei polarimetrischen Anordnungen bietet ein gutes Mittel für photometrische Messungen dar, das schon frühzeitig in verschiedenen Konstruktionen ausgenutzt worden ist. Es seien hier nur einige bewährte Formen beschrieben. Die erste Form dient für allgemeine Untersuchungen (Abb 17). Bei dem KÖNIG-MARIENSSchen Polarisationsphotometer werden die Intensitäten zweier Blenden B_1 und B_2 verglichen, deren erste unter Zwischenschaltung einer lichtstreuenden Scheibe Licht von der Vergleichslichtquelle L , deren zweite Licht von der auszuwertenden Leuchtfläche über einen diffus streuenden Schirm S und eine ablenkende Prismenkombination P erhält. Die von den Blenden B_1 und B_2 kommenden Strahlen, deren Apertur durch die Blende B_3 begrenzt wird, werden durch die mit dem WOLLASTON-Prisma verbundene Linse parallel gemacht und in je zwei senkrecht zueinander polarisierte Bündel zerlegt, von denen zwei ebenfalls senkrecht zueinander polarisierte benutzt werden, um in der Okularblende Bilder der Öffnungen B_1 und B_2 zu erzeugen. Die durch das Okularmikroskop betrachtete Kante des Doppelprismas teilt das Gesichtsfeld in zwei bei Drehung des Nikols in der Helligkeit sich

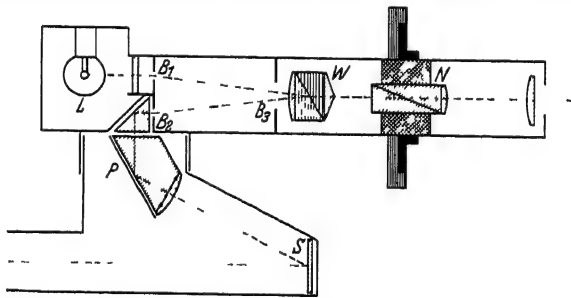


Abb 17 Polarisationsphotometer nach KÖNIG-MARIENSS

Abb 17 Polarisationsphotometer nach KÖNIG-MARIENSS

¹ LAPROVOSTAYF u. DESAINS, Ann Phys Chim (3) 34, S 215 (1852), WRIGHT, Ann d Phys (4) 1, S 17 (1900), UMOV, Phys Z 6, S 674 (1905), WORONKOI u. POKROWSKI, Z f Phys 30, S 139 (1924), SHOULEYKIN, Phil Mag 48, S 307 (1924)

² Siehe HASSFELTIN, Handb d Astrophysik Bd II/2 1931

andernde Teile. Der Apparat kann benutzt werden zur Messung der Polarisation des Himmelslichtes sowie zu densitometrischen Messungen.

Beim WILDSchen Polarisationsphotometer¹ gelangt das Licht der beiden zu vergleichenden Öffnungen über zwei Rhomboidprismen *A* zunächst zu einer Polarisationsprisma *B* und durchsetzt dann ein Kalkspatrhomboid *C*, durch das zwei räumlich sich deckende Teilbündel der von den Öffnungen ausgehenden Strahlen erzeugt werden, die senkrecht zueinander polarisiert sind. Da

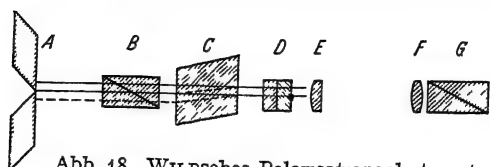


Abb 18 WILDSches Polarisationsphotometer

Intensitätsverhältnis der beiden Schwingungen, das mit demjenigen der beiden zu vergleichenden Lichtquellen identisch ist, wird durch ein SARVARISches Polarisoskop *D* ermittelt (Abb 18).

Das aus den Linsen *E* und *F* bestehende Beobachtungssystem liefert ein scharfes Bild der Trennungslinie der Prismen *A*. *G* ist der zum Polarisoskop gehörende Analysator.

Das NUTTINGSche Photometer² ist besonders geeignet für Absorptionsmessungen. Die von dem leuchtenden Spalt *S* ausgehenden Strahlen (Abb 19) gelangen zu einer Linse *L*, die die Strahlen parallel macht. Die durch die vorgesetzte Blende räumlich getrennten Bündel durchsetzen auf der einen Seite die

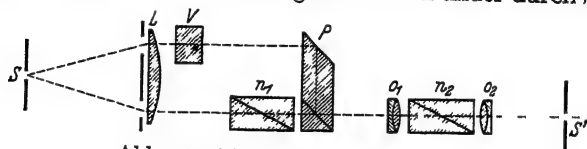


Abb 19 NUTTINGSches Photometer

zu untersuchende absorbierende Substanz *V*, auf der anderen ein Nicol *n*₁, worauf die beiden Bündel durch eine Prismenkombination *P* zusammengeführt werden, wobei die Trennungsebene *S'* abgebildet werden kann. Da diese durch die folgenden Objektive *O*₁ und *O*₂ in der Spaltebene *S'* abgebildet werden kann, kann auch in dem folgenden Spektralapparat jede Linse oder Blende beliebig in ihrer Längserstreckung unterteilt werden. Das Nicol *n*₂ dient zur Abgleichung der Intensitäten.

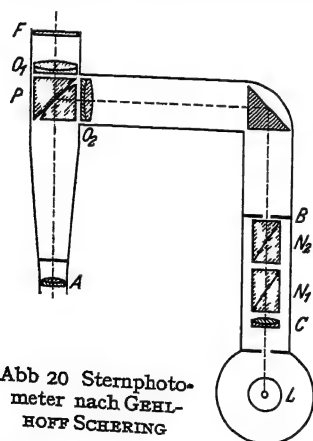


Abb 20 Sternphotometer nach GEHLHOFF-SCHERING

Abb 20 zeigt den Aufbau des Sternphotometers nach GEHLHOFF-SCHERING³. Bei ihm ist ein neues Meßprinzip verwendet worden, das eine bedeutende Erhöhung der Genauigkeit der Messung auch bei punktförmigen Lichtquellen ermöglicht. Ohne Zwischenschaltung regelmäßiger oder diffus reflektierender Flächen wird das Bild der Lichtquelle in der Pupille des Auges entworfen, wodurch erreicht wird, daß der Vergleich auf Flächen statt auf Punkte zurückgeführt wird. Daher können mit einem solchen Photometer auch sehr schwache Lichtquellen aus-

¹ WILD, Pogg Ann 118, S 193 (1863), Mousson, Physik 3, S 712 (1880)

² L. C. MARTIN, Optical Measuring Instruments, S 224 London 1924

³ Z f techn Phys 1, S 247 (1920), 4, S 391 (1923), vgl auch MÜLLER, Photometrie der Gestirne Leipzig 1897

gewertet werden. Der Fehler ist durchschnittlich 0,01 Größenklasse. Während die Objektive O_1 und O_2 das vom Sternbild bzw. von der Blende B ausgehende Licht parallel machen und dem Prisma P zulenken, dessen Trennungsfläche mit dem Okular A beobachtet wird, geschieht die Abschwächung der Vergleichslichtquelle L , die durch C auf der Blendenebene B abgebildet wird, durch zwei Nikols N_1 und N_2 , die gegeneinander gedreht werden. Bei sehr geringen Helligkeiten empfiehlt sich die Einschaltung eines dritten Nikols zwischen L und B . F ist ein Farbfilter zum Ausgleich der Farbenunterschiede von Stern und Vergleichslichtquelle.

b) Interferenz.

11 Grundlagen Einige Erscheinungen, vor allem die von O. WILNER gemachte Beobachtung der stehenden Lichtwellen, haben den periodischen Charakter der Lichtwellen erwiesen. Jedem Glied einer FOURIERSchen Reihe, in die man den Vektor f oder g entwickeln kann, läßt sich also eine physikalische Bedeutung beimessen. Man bezeichnet eine solche in einfachster Weise durch eine trigonometrische Funktion darstellbare periodische Welle

$$A = a \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - \delta\right)$$

als eine homogene Welle, von der aber vorausgesetzt werden muß, daß der durch sie gegebene Schwingungszustand nur während einer bestimmten Zeit erhalten bleibt. Strenggenommen ist jede Welle aus zahlreichen Einzelwellen nahezu gleicher Periode zusammengesetzt, so daß sowohl die Amplitude a wie die Phasenkonstante δ mit der Zeit langsam veränderlich ist. Dieses Zeitintervall, in dem die Welle als regelmäßig anzunehmen ist, ist im allgemeinen klein gegenüber den Beobachtungszeiten. Zwei beliebige Wellen werden daher, selbst wenn sie von verschiedenen Punkten derselben Lichtquelle ausgegangen sind, keinen Zusammenhang zwischen den Bestimmungsgrößen a und δ aufweisen, und ihre Gesamtwirkung ergibt sich, indem man die Summe ihrer Mittelwerte bildet. Sind die Wellen aber kohärent¹, d. h. besteht zwischen den Größen a und δ ein gesetzmäßiger Zusammenhang, so ist die Intensität der resultierenden Welle eine periodische Funktion des Ortes, es entstehen Interferenzerscheinungen, die geeignet sind, genaue Aufschlüsse über die spektrale Beschaffenheit der Welle zu geben. Freilich ist hierbei Bedingung, daß die beiden interferierenden Wellen gleiche Periode haben. Ist dies nicht der Fall, so ergeben sich Schwebungen, also Intensitäten, die für jeden in Betracht kommenden Ort noch zeitlich veränderlich sind. Solche im wesentlichen theoretisch wichtigen Interferenzerscheinungen sind bereits von DOVR² und AIRY³ behandelt worden. Das tatsächliche Eintreten solcher Änderungen ist von RICHI⁴ durch Versuch nachgewiesen worden.

Bei gleicher Periode (gleicher Wellenlänge) und Kohärenz der sich überlagernden Wellen, die am besten durch Reflexion oder Brechung der von einer Lichtquelle ausgehenden Schwingungen erzeugt werden, bilden sich innerhalb eines begrenzten Raumes Intensitätsunterschiede, bei denen der Abstand zweier aufeinanderfolgender Extremwerte sich mit der Wellenlänge sehr stark ändert und gestaltet, entweder bei konstanter Wellenlänge Längen in Bruchteilen der

¹ M. v. LAUE, Verh. d. Dtsch. Phys. Ges. 9, S. 606 (1907)

² Pogg. Ann. 71, S. 97 (1847)

³ Undulatory Theory of Optics, 3. Ed. 1877, S. 156

⁴ Nuovo Cimento (3) 14, S. 173 (1883), J. de Phys. (2) 2, S. 437 (1883)

bekannten Wellenlänge zu messen oder andererseits kleinste Wellenlängenänderungen zu bestimmen¹

Beschränkt man sich auf diejenigen Vorgänge, bei denen zwei oder mehrere durch Beugung nicht beeinflusste, in nahezu gleicher Richtung fortschreitende Wellen gleicher Periode den Lichtvektor bestimmen (Interferenzen im engeren Sinne), so kann zweckmäßig eine Einteilung vorgenommen werden nach der Größe der verwendbaren Lichtquelle. Für das Zustandekommen der Interferenzerscheinungen der ersten Gruppe ist eine Begrenzung der Fläche der Lichtquelle durch eine punkt- oder spaltförmige Blende erforderlich, womit bereits gesagt ist, daß infolge der Einschnürung der wirksamen Strahlenbündel gleichzeitig Beugungerscheinungen auftreten werden, die eine Beobachtung der reinen Interferenzerscheinung erschweren, während bei der zweiten Gruppe ausgedehnte Lichtquellen und Bündel von großem Querschnitt genügen. Freilich ist im zweiten Falle das Raumgebiet, in dem die Interferenzen sichtbar sind, sehr beschränkt, im Grenzfalle auf eine Fläche oder einen Teil einer solchen, bei punktförmigen Lichtquellen ist der Interferenzraum ausgedehnt.

Zu den Interferenzerscheinungen der ersten Gruppe gehören diejenigen, welche schon zu Beginn des 19. Jahrhunderts bekannt, wesentlich dazu beigetragen haben, den Kampf zwischen Undulationstheorie und NEWTONScher Emissionstheorie des Lichtes zugunsten ersterer zu entscheiden, nämlich die mit Hilfe der FRESNELSchen Spiegel oder des Doppelp Prismas erzeugten sowie die Erscheinungen bei BILLETschen Halblinsen, bei gemischten Blättchen u. a.² Die zweite Gruppe umfaßt alle Erscheinungen, die bei Vorhandensein dünner Blättchen oder auch dickerer Platten, vorzüglich solcher mit planparallelen Begrenzungsflächen, auftreten. Ausgehend von den NEWTONSchen Ringen gelangt man so zu den HÄIDINGERSchen, HERSCHEL'Schen, JAMINSchen Streifen und schließlich zu den als Interferenzen gleicher Neigung bezeichneten Formen, die zur Konstruktion der Interferenzapparate hoher Auflösungsfähigkeit geführt haben.

12 Interferenzen bei punktförmiger Lichtquelle Werden von einer punktförmigen Lichtquelle L zwei eng benachbarte Bilder L_1 und L_2 erzeugt, von denen eines, wie beim LLOYDSchen³ Versuch, durch die Lichtquelle selbst ersetzt werden kann (Abb. 21), so überlagern sich die den Bildern entsprechenden reflektierten oder gebrochenen Lichtwellen, deren Amplitude nahezu gleich ist, innerhalb eines durch die Abmessungen der ablenkenden Elemente gegebenen Raumes. Die beiden Elementarwellen

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= a_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \delta_1\right), \\ A_2 &= a_2 \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \delta_2\right), \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

deren Schwingungsrichtung als gleich vorausgesetzt werden kann, da die in

¹ Über die quantentheoretische Behandlung der Interferenzen L. DE BROGLIE, C. R. 177, S. 548 (1923), G. BREIT, Proc. Nat. Amer. Acad. 9, S. 238 (1923), W. GERLACH u. A. LANDL, Z. f. Phys. 36, S. 169 (1926), A. J. DEMPSTER, Phys. Rev. (2) 27, S. 804 (1926), G. WATAGHIN, Z. f. Phys. 51, S. 593 (1928). Die Folgerungen decken sich im allgemeinen mit denen der klassischen Theorie, s. auch E. FERMI, Lincei Rend. (6) 10, S. 72 (1929), Cim. (N. S.) 7, S. 153 (1930), G. RACAH, Lincei Rend. (6) 11, S. 837 (1930).

² Eine historische Zusammenstellung findet sich in E. GEHRCKE, Handb. der physikalischen Optik, S. 317 ff. Leipzig 1927. Betr. Erklärung der Interferenzen nach der NEWTONSchen Emissionshypothese s. auch F. KLEMM, Die Geschichte der Emissionstheorie des Lichtes. Weimar 1932.

³ Trans. R. S. Edinb. 17, S. 174 (1837), Pogg. Ann. 45, S. 95 (1838), E. MASCART, Traité d'Opt. 1, S. 184 (1899), J. B. GREEN, J. Opt. Soc. Amer. 7, S. 299 (1923).

jeder Welle vorhandenen linearpolarisierten Anteile getrennt betrachtet werden können, setzen sich zu einer Schwingung zusammen, die in der Form

$$B = \{a_1 + a_2 \cos(\delta_1 - \delta_2)\} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \delta_1\right) + a_2 \sin(\delta_1 - \delta_2) \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \delta_1\right) \quad (31)$$

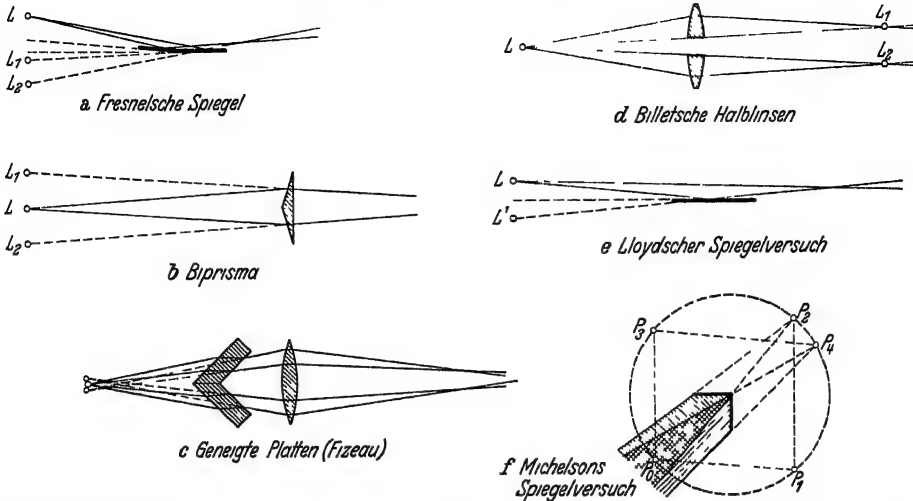


Abb 21 Anordnungen zur Erzeugung von Interferenzen geringen Gangunterschiedes mit Hilfe von Spiegeln, Linsen und Prismen

dargestellt werden kann, also wieder eine Schwingung von gleicher Periode ergibt, deren Amplitude b ist

$$b = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\delta_1 - \delta_2)} \quad (32)$$

ist. Die Lichtstärke (Helligkeit, Intensität) J einer linearpolarisierten Welle, die sich als Summe der potentiellen und kinetischen Energie der schwingenden Äthertheilchen ergibt, läßt sich darstellen in der Form

$$J = b^2 \quad (33)$$

Nach der elektromagnetischen Theorie folgt für die Energie, die in der Zeit dt durch eine in einer Wellenfläche liegende Fläche F hindurchgeht,

$$\mathcal{E} = F \, dt = \frac{q}{4\pi} (f^2 + g^2) F \, dt,$$

wobei in einer hinreichend großen Zeit für die Mittelwerte zu setzen ist

$$\frac{1}{T} \int_0^T f^2 dt = \bar{f}^2, \quad \frac{1}{T} \int_0^T g^2 dt = \bar{g}^2,$$

so daß die in der Zeiteinheit durch die Fläche F gestrahlte Energie gleich der Summe der Quadrate der voneinander unabhängigen Amplituden ist

Die Intensität ist somit abhängig von dem Phasenunterschied $(\delta_1 - \delta_2)$ der Teilwellen. Setzt man gemäß Abb 22 $Om = x$, $OP = y$, so sind die Wege von L_1 und L_2 nach P bei $L_1L_2 = l$

$$\sqrt{x^2 + \left(\frac{l}{2} + y\right)^2} - \sqrt{x^2 + \left(\frac{l}{2} - y\right)^2}$$

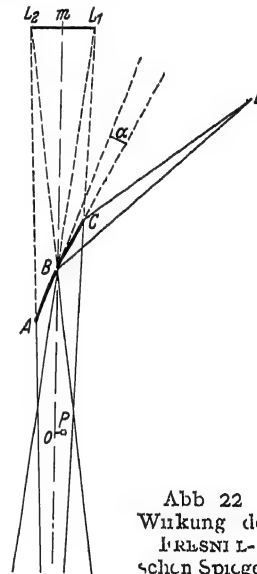


Abb 22
Winklung des
Lichtes an einem
Spiegel

und damit der Phasenunterschied im Punkte P bei der Wellenlänge λ

$$\delta_1 - \delta_2 = \frac{2\pi ly}{\lambda x}$$

Bei gleichen Amplituden beider Elementarbündel ($a_1 = a_2$) ist daher

$$J = 4a^2 \cos \frac{\pi ly}{\lambda x}, \quad (34)$$

und die Intensität ändert sich periodisch sowohl mit x wie mit y . Die Höchstwerte werden viermal so groß wie bei Wirkung eines der Lichtpunkte L_1 oder L_2 , der Übergang zu den absoluten Minimalwerten erfolgt sinusförmig, ein Verhalten, das allen durch Zusammenwirkung zweier Elementarbündel entstehenden Interferenzen gemeinsam ist. Sind die Intensitäten der Einzelbündel ungleich, so baut sich die Helligkeitsschwankung auf einem gleichförmigen Grunde von der Lichtstärke $a_1^2 - a_2^2$ auf, die Sichtbarkeit der Interferenzen wird also kleiner wegen der geringeren Helligkeitsunterschiede.

Die Form der Flächen gleicher Helligkeit, die sich nach den Näherungsrechnungen als Kegel mit der Achse mO ergeben wurden, sind in Wirklichkeit zweischalige Hyperboloide, deren Brennpunkte die sekundären Lichtquellen selbst sind, denn für sie gilt unmittelbar die Beziehung, die die Orte gleicher Helligkeit auszeichnet: die Differenz der Wege von L_1 und L_2 nach einem Punkt der Hyperboloidflächen ist konstant.

Die an dem Beispiel der FRESNELSchen Spiegel durchgeführten Betrachtungen lassen sich ohne weiteres auf die übrigen in Abb 21 zusammengestellten Interferenzen übertragen. Es entstehen nur Streifen von niedriger Ordnung (von kleinem Gangunterschied), die symmetrisch zu dem achromatischen Streifen nullter Ordnung liegen. Daher sind die Interferenzen auch im weißen Licht sichtbar im Gegensatz zu den Interferenzen höherer Ordnung, die nur im homogenen Lichte beobachtet werden können und deshalb im allgemeinen eine ziemlich weitgehende Vorzerlegung des Lichtes benötigen. Andererseits ist zu beachten, daß sowohl die Ausdehnung der Lichtquelle wie auch die Aufstellung der ablenkenden Elemente Einfluß auf die Intensitätsverteilung hat. Besonders trifft dies zu für die mit Spiegelung arbeitenden Kombinationen, weil bei ihnen jede Lagenänderung der Spiegel sich als Ablenkung oder Verschiebung der Strahlen mit doppelter Größe auswirkt.

Einfacher zu handhaben sind die an das FRESNELSche Biprisma anschließenden Anordnungen, bei denen freilich die Entfernung zweier aufeinanderfolgender Streifen noch von dem Brechungsindex der verwendeten Materialien abhängt¹. Wesentlich ist hierbei, daß die für den Streifenabstand maßgebende Ablenkung durch die Prismenteile, die bei der Kleinheit der brechenden Winkel ε in der Form $(n - 1)\varepsilon$ geschrieben werden kann, durch Einbettung des Prismas in ein Medium von höherem Brechungsindex abnimmt. Eine geeignete Anordnung ist von WINKELMANN² angegeben worden.

Den Übergang von den vorerwähnten Interferenzerscheinungen, bei denen für die Mitte des Streifensystems der Gangunterschied Null ist, zu denjenigen, welche einen endlichen Gangunterschied für die Mitte ergeben, bilden die Ringe, die bei gemischten Blattchen auftreten. Besteht eine dünne, als planparallel zu betrachtende Schicht aus einer größeren Zahl von Elementen mit verschiedenem Brechungsindex, so erleiden die durchgehenden Wellenteile je nach der Größe der Brechungszahl verschiedene Verzögerungen, und das Bild der Lichtquelle

¹ A. FRESNEL, Œuvres compl. 1, S. 330 (1866—1870)

² Zf Instrk 22, S. 275 (1902)

erscheint durchzogen und umgeben von farbigen Ringen, deren Abstand verhältnismaßig groß ist. Die ersten Beobachtungen dieser Art rühren her von THOMAS YOUNG, dessen Erklärung jedoch nach BREWSTER nicht als völlig einwandfrei angesehen werden kann¹.

Nimmt man die Lichtquelle in großer Entfernung an und betrachtet man demgemäß die interferierenden Wellenzüge als parallel, so findet man bei einer Plattendicke d den Gangunterschied der durch die Medien mit den Brechungs-
zahlen n_1 und n_2 gehenden Teilwellen gleich [s. Ziff 9]

$$d(\sqrt{n_1^2 - \sin^2 i} - \sqrt{n_2^2 - \sin^2 i}), \quad (35)$$

woraus für senkrechten Einfall folgt

$$d(n_1 - n_2),$$

während für die Einfallswinkel i_m , für welche der Gangunterschied gegen die Mitte ein ganzes Vielfaches einer Wellenlänge beträgt, gilt

$$\sin^2 i_m = \frac{4p(n_1 + p)(n_2 - p)(n_1 - n_2 + p)}{(2p + n_1 - n_2)^2}, \quad \text{wobei} \quad 2p = \frac{m\lambda}{d} \quad (36)$$

Selbstverständlich überlagern sich dieser Erscheinung infolge des Vorhandenseins der Begrenzungsflächen der einzelnen kleinen Elemente stets Beugungserscheinungen, die aber verhältnismaßig leicht von den Interferenzringen getrennt werden können².

Eine genauere Behandlung dieser Erscheinungen erfordert die Berücksichtigung der Reflexion und Brechung an den Grenzen der verschieden brechenden Elemente gemischter Platten. Es gelingt so, die Besonderheiten zu erfassen, die bei den einfachen Annahmen nicht erklärt werden können³. Rein geometrisch-optisch findet man Strahlen, die nicht durch ein Element von bestimmtem Brechungsindex mit einfacher Brechung beim Eintritt und Austritt verlaufen, sondern nach dem Eintritt in die Schicht ein oder zwei Brechungen

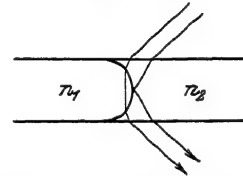


Abb 23 Interferenzen gemischter Platten

oder eine Reflexion an den Zwischenflächen erleiden und trotzdem parallel austreten, wie Abb 23 andeutet. Ähnlichen Strahlenverlauf zeigt die von OHM⁴ beschriebene Erscheinung, die bei einer punktförmigen Lichtquelle entsteht, wenn in den Gang der Lichtstrahlen eine Planparallelplatte mit abgeschrägtem oder abgerundetem Rand hineingebracht wird.

13 Interferenzen dünner Blattchen Die grundlegenden Beobachtungen für diese Gruppe von Erscheinungen gehen auf BOYLE, HOOKE und NEWTON zurück. Es handelt sich dabei zunächst um die Farbenercheinungen, die dünne Schichten durchsichtiger Substanzen annehmen, wenn sie, in Medien von abweichendem Brechungsindex eingebettet, im durchgehenden oder reflektierten Licht betrachtet werden, wobei die Farbe oder bei homogenem Licht die Intensität an einem bestimmten Orte abhängig ist von der Dicke der Schicht und dem Einfallswinkel.

Die Erklärung für diese Erscheinungen ist bereits durch die vorhergehenden Erörterungen gegeben. Durch Aufspaltung der einfallenden Welle an den Grenzflächen der Schicht in einen reflektierten und einen gebrochenen Teil entstehen

¹ TH. YOUNG, Phil Trans 1802, S 390, D. BREWSTER, ebenda 1838, S 73

² Siehe hier zu K. EXNER, Sitzber K Akad Wiss Berl 1875, II Abt., 11. März und 25. Nov.

³ C. V. RAMAN u. B. BANERJEE, Phil Mag 41, S 338, 860 (1921), C. V. RAMAN u. K. S. RAO, ebenda 42, S 679 (1921)

⁴ Pogg Ann 49, S 105 (1840)

Teilwellen von verschiedener Amplitude, von denen jedoch meist nur zwei in Betracht kommen, weil die Amplitude der übrigen außerordentlich klein wird, ihre Wirkung also vernachlässigt werden kann.

Die FRESNELSchen Reflexionsformeln geben für senkrechten Einfall unabhängig von dem Polarisationszustand einen Reflexionsfaktor

$$\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2,$$

der für die normalerweise in Betracht kommenden Substanzen Werte zwischen 0,02 und 0,08 annimmt, so daß bei Betrachtung der einmal reflektierten Bündel die Intensitäten sich wie 1 1,1 bzw wie 1 1,2 verhalten, während die weiteren Komponenten in der Größenordnung von 0,00001 bzw 0,0001 liegen. Beim durchgelassenen Licht sind die zweimal reflektierten Anteile nur Bruchteile eines Prozentes der direkt durchgelassenen Strahlung, und die Interferenzstreifen sind bei der sinusförmigen Intensitätsänderung, die in beiden Fällen vorhanden ist, sehr schwach sichtbar. Der Gangunterschied der interferierenden Wellen ist für den Einfallswinkel 0° gleich dem doppelten Produkt $2nd$ aus Brechungsindex und Dicke, vermehrt um die Phasenänderung, die bei Reflexion im dichteren am dünneren Medium stattfindet.

Die Anwendung dieser im weißen Licht nur in wenigen Ordnungen im homogenisierten Licht auch bei höherer Ordnungszahl sichtbaren Interferenzen ist im allgemeinen nur beschränkt, zumal eine strenge Behandlung, die bei keilförmiger Schicht und Einschluß größerer Einfallswinkel notwendig wird, ziemlich umständliche Formeln erhält, die zeigen, daß der Ort der Interferenzen keineswegs innerhalb der Schicht liegt, ferner, daß die Richtung der Streifen nicht streng den Stellen gleicher Dicke folgt. Eine unmittelbare Bestimmung der Schichtdicke ist daher nur möglich, wenn unter nahezu senkrechtem Einfall bei geringem Keilwinkel beobachtet wird, ein Fall, der praktisch zur Feststellung geringer Abweichungen einer optisch wirksamen Fläche gegenüber einer als fehlerfrei zu betrachtenden (Probefläche) benutzt wird, wobei noch beachtet werden muß, daß bei ungenügenden Dickenabmessungen der zu vergleichenden Stücke infolge der Adhäsionskräfte Deformationen auftreten, die wesentliche Änderungen der Flächenformen bedingen.

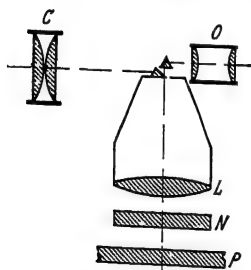


Abb 24 Interferenzapparat zur Prüfung von Planflächen

Abb 24 wiedergegeben. Das von einer ziemlich homogenen Lichtquelle (Quecksilberlampe, Heliumrohr) ausgehende Licht wird durch den Kondensor C dem Ab-

¹ W FEUSSNER, Wied Ann 14, S 566 (1881), Sitzber Ges z Beford d Nat Wiss Marburg 1888 S 76, s auch E v D PAHLEN, Ann d Phys (4) 39, S 1567 (1912), eine Anwendung zur Bestimmung des Durchmessers dünner Drähte s H KREUSIER, Z f techn Phys 13, S 241 (1932)

² S CZAPSKI, Z f Instrk 5, S 149 (1885), E BRODHUN u O SCHONROCK, ebenda 22, S 355 (1902), M SCHULTZ, ebenda 32, S 258 (1912), H SCHULZ, ebenda 34, S 252 (1914), s auch G MABBOUX, Rev d'Opt 6, S 470 (1927)

lenkungsprisma zugeleitet und gelangt durch die Beleuchtungslinse L , die gleichzeitig als Lupe (oder Fernrohrobjektiv) dient, zu der schwach keilförmigen, mit der Normalfläche versehenen Platte N , unter die das zu prüfende Stück P mit Hilfe eines auf Kugeln geführten Schlittens gebracht wird, zur Einstellung auf Parallelität der zu prüfenden Flächen dienen feingängige Schrauben an der Fassung der Normalplatte, die durch Schneckentrieb gesenkt werden kann. Bei Beobachtung der Ringe gleicher Neigung (s. w. u.) wird das Okular O benutzt.

Als einfaches Hilfsmittel zur angenäherten Bestimmung der Wellenlängen kann man vor dem Spalt ein Blättchen anbringen, das durch den Spalt hindurch von der Seite des Kollimators her mit weißem Licht beleuchtet wird. Ist dieses schwach keilförmig und die Keilkante parallel zur Spaltichtung, so erscheint das Spektrum von Interferenzstreifen durchzogen (kanneliertes Spektrum), deren Entfernung sich aus der Gleichung

$$p_a \lambda_a = p_b \lambda_b = 2d \quad (37)$$

ergibt, wobei d die Dicke des Blättchens, λ_a und λ_b die Wellenlängen in diesem, p_a und p_b die auf die doppelte Dicke des Blättchens entfallende Zahl der Wellenlängen bedeuten. Ist eine der Wellenlängen bekannt, dann ist die andere durch Auszählung der zwischen ihnen liegenden Streifen unmittelbar zu ermitteln.

Unter geeigneten Umständen gelingt es, die Zahl der zur Erzeugung der Interferenzstreifen beitragenden Teilwellen bedeutend zu erhöhen, indem durch Erhöhung des Reflexionskoeffizienten auch den mehrfach reflektierten Anteilen eine noch merkliche Intensität zugeführt wird. Dies kann geschehen entweder durch Vergrößerung des Einfallswinkels, mit dem die FRESNEL'schen Reflexionskonstanten anwachsen, oder durch Anwendung mehr oder weniger durchlässiger Metall- (Silber-) Schichten, die durch chemischen Niederschlag oder kathodische Zerstaubung erhalten werden¹. Mit wachsender Zahl der wirkenden Teilwellen wird der Abfall vom Maximum zum Minimum steiler und der Unterschied zwischen Maximum und Minimum nimmt mit dem Anwachsen der Reflexionskoeffizienten zu.

Diese Gesetzmäßigkeiten zeigen sich am deutlichsten bei den HERSCHEL'schen Streifen, die an einer dünnen Luftschicht zwischen zwei rechtwinkligen Prismen entstehen (Abb. 25)². Bei hinreichend dünner Luftschicht entstehen in der Nähe der Grenze der Totalreflexion schon bei Beleuchtung mit weißem Licht Interferenzstreifen von um so größerer Scharfe, je näher sie der genannten Grenze liegen. Die Erscheinung liegt im Unendlichen wird also bei Akkommodationsruhe auf die Netzhaut oder bei Zwischenschalten einer Linse in der Brennebene abgebildet.

Die Intensität hängt ab von den Reflexionskoeffizienten und vom Einfallswinkel und kann auf folgendem Wege gefunden werden. Trifft eine Welle mit der Normalen AB_1 aus dem ersten Medium kommend (Abb. 26) auf die erste Grenzfläche, so entstehen aus dem Strahl AB_1 eine Reihe von reflektierten Strahlen B_1E_1 , B_2E_2 , B_3E_3 , sowie durchgehende C_1D_1 , C_2D_2 , C_3D_3 , von ab-

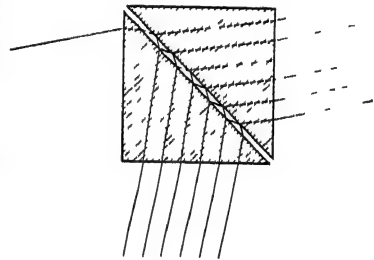


Abb. 25 Färbung HERSCHEL'scher Streifen

¹ R. RITSCHL, Zf Phys 69, S. 578 (1931)

² W. HERSCHEL, Phil Trans 1809, S. 274, W. LALBOI, Phil Mag (3) 9, S. 401 (1836), O. IUMMER, Sitzber K Akad Wiss Berl 24, S. 504 (1900), s. auch H. JOACHIM, Nachr K Ges d Wiss Göttingen Mai 1907

nehmender Amplitude, die sich zu je einer Welle zusammensetzen, deren Wellenfunktion für das durchgelassene Licht ist

$$\sum_{p=0}^{\infty} \mu_1 \mu'_1 (\mu')^{2p} f\left(t - \frac{r}{q} - \frac{(2p+1)\delta}{q_1} - \frac{e_{p+1}}{q}\right) \quad (38)$$

Die Koeffizienten μ' , μ_1 , μ'_1 , die die Änderung des Lichtvektors beim Übergang über die Grenzflächen und bei der Reflexion darstellen, lassen sich auf einen Koeffizienten zurückführen vermöge der Beziehungen

$$\mu' = -\mu, \quad \mu_1 = 1 + \mu, \quad \mu'_1 = 1 - \mu,$$

während für das Argument abkürzend gesetzt werden kann

$$\alpha = p\beta,$$

so daß (38) übergeht in

$$\sum_{p=0}^{\infty} (1 - \mu^2) \mu^{2p} f(\alpha - p\beta)$$

Setzt man weiter für f

$$f(t) = e^{i\omega t},$$

Abb 26 Interferierende Teilbündel bei einer Planparallelplatte

so daß der reelle Teil eine homogene Welle von der Frequenz ω darstellt, so wird

$$\sum_{p=0}^{\infty} (1 - \mu^2) \mu^{2p} e^{i\omega(\alpha - p\beta)} = \frac{(1 - \mu^2) e^{i\omega\alpha}}{1 - \mu^2 e^{-i\omega\beta}},$$

und bei Isolierung des reellen Teiles ergibt sich die Intensität der in der vorgegebenen Richtung fortschreitenden Welle

$$J_d = \frac{(1 - \mu^2)^2}{1 - 2\mu^2 \cos \omega\beta + \mu^4}, \quad (39)$$

wobei

$$\omega\beta = \frac{4\pi d \cos r}{\lambda} n$$

Für die reflektierte Welle ergibt sich aus dem Energieprinzip

$$J_r = 1 - J_d = \frac{4\mu^2 \sin^2 \frac{\omega\beta}{2}}{1 - 2\mu^2 \cos \omega\beta + \mu^4} \quad (40)$$

Durchgelassene und reflektierte Streifensysteme sind also komplementär zueinander¹ Im durchgelassenen Licht sind die Maxima scharf auf dunklem Grunde, im reflektierten Licht sind die Minima vollkommen, d. h. sie haben die Intensität Null. Der Kontrast, für den gemäß (39) folgt

$$\frac{J_{\min}}{J_{\max}} = \left(\frac{1 - \mu^2}{1 + \mu^2} \right)^2,$$

wächst mit dem Werte des Reflexionskoeffizienten, doch ist zu beachten, daß bei $\mu = 1$ die gesamte Energie bereits in den ersten Strahl $B_1 E_1$ verlegt wird, eine Interferenzerscheinung daher nicht zustande kommen kann. Bei endlicher Zahl der mitwirkenden Bündel treten zwischen den Hauptmaxima schwächere Nebenmaxima auf, die gemäß folgender Gleichung

$$J_d = (1 - \mu^2)^2 \frac{(1 - \mu^{2p})^2 + 4\mu^{2p} \sin^2 \frac{p\omega\beta}{2}}{(1 - \mu^2)^2 + 4\mu^2 \sin^2 \frac{\omega\beta}{2}} \quad (41)$$

¹ O. LUMMER, Sitzber. K. Akad. Wiss. Berl. 24, S. 504 (1900)

mit der Zahl der zur Wirkung gelangenden Bündel wachsen. Die beobachteten Erscheinungen entsprechen vollkommen den Folgerungen der Theorie, die auch noch auf den Fall ausgedehnt werden kann, daß das einfallende Licht in einem beliebigen Azimut linearpolarisiert ist¹

Ist der Wert der Reflexionskoeffizienten nahezu 1, so tritt eine Verdopplung der Streifen auf, die am deutlichsten hervortritt, wenn das erste Buschel ausgelöscht wird, was sehr leicht erreicht werden kann, weil die Azimute der austretenden Strahlenbündel sehr verschieden sind. Diese Erscheinung ist außerordentlich empfindlich gegen Phasenänderungen und ist deshalb von SORGE benutzt worden, um geringe Elliptizitäten zu messen, wobei als Besonderheit erwähnt sein mag, daß bei dieser Methode die Unterscheidung von negativer und positiver Elliptizität unmittelbar erzielt wird², ebenso eignet sich das Verfahren zur Feststellung geringer Doppelbrechungen. Bei Anwendung eines geeigneten Kompensators lassen sich bei 1 cm Dicke noch Brechungsindexdifferenzen von $5 \cdot 10^{-7}$ messen.

14 MICHELSONSches Interferometer Statt die beiden zur Erzeugung kohärenter Lichtquellen dienenden reflektierenden Flächen unmittelbar hinter- oder nebeneinander anzuordnen, benutzt MICHELSON Hilfsspiegel, die es ermöglichen, beide räumlich getrennt aufzustellen und dadurch die beiden interferierenden Strahlenwege vollständig zu trennen. Zu diesem Zwecke dient eine (gegebenenfalls halbdurchlässig versilberte) Glasplatte G_1 , an der das von der Lichtquelle L (Abb. 27) kommende Licht aufgespalten wird. Ein Teil gelangt nach Durchgang durch die Platte G_1 zum Spiegel S_1 und von dort aus zurück nach G_1 und zum Beobachter B . Der andere Teil gelangt durch die Platte G_2 zum Spiegel S_2 und rückwärts durch G_2 und G_1 ebenfalls zum Beobachter B . Das Prinzip, das mannigfachen Abwandlungen fähig ist³, erlaubt eine vielfache Anwendung, zumal man durch Neigung eines der Spiegel von den Interferenzen planparalleler Platten zu solchen keilförmiger übergehen kann und die Auswertung dadurch erleichtert wird, daß die theoretischen Voraussetzungen sehr einfache sind: die Einfallswinkel sind klein, mehrfache Reflexionen treten nicht auf, und der Einfluß der Brechungen der Platten G_1 und G_2 ist ausgeschaltet, wenn diese von gleicher Dicke sind.

Je nach Stellung der Spiegel zueinander sind die Interferenzen gerade Linien oder Kegelschnitte, die bei Neigung der Spiegel im Endlichen liegen, während bei Parallelstellung in der Brennebene eines Objektivs Kreise entstehen. Ein gewisser Widerspruch zu den Folgerungen FREUSNIERS ist von G. KRAUSE⁴ aufgeklärt worden, der zeigte, daß die Interferenzkurven bei kleinem Öffnungswinkel des optischen Systems vom 4. Grades sind und daher auch in die vorherwähnten Kurven 2. Grades übergehen können. Die Abweichungen der

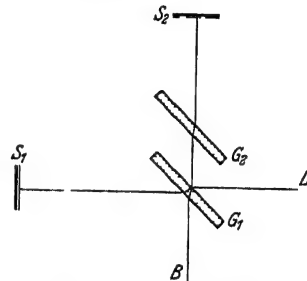


Abb. 27 MICHELSONSches Interferometer

¹ O. JUMMIG, Ann d Phys 23, S 49 u. 63 (1907), II. SCHULTZ, ebenda (4) 26, S 139 (1908).

² K. SORGE, Inaug.-Diss. Bielefeld 1909.

³ A. A. MICHELSON, Amer J of Science (3) 39, S 115 (1890), Light Waves and their Uses, Chicago 1907.

⁴ Ann d Phys (4) 48, S 1037 (1915). Statt der Glasplatte G_1 kann ein Prismenpaar mit versilberter Zwischenschicht benutzt werden. Siehe R. M. LANGIER, J Opt Soc Amer 16, S 134 (1928). Die Kompensationsplatte fällt dann fort. Ein einfacheres Verfahren zur Demonstration der Wirkungsweise des MICHELSONSchen Interferometers siehe O. J. KNEISER, Z Phys 30, S 251 (1929).

FEUSSNERSchen Theorie sind also auf die Näherungen zurückzuführen, die vorgenommen werden mußten, um bei ausgedehnten Lichtquellen zu geschlossenen Ausdrücken zu gelangen

Die Anordnung ist in verschiedener Weise ausgenutzt worden. Wie bereits bemerkt, ist die Intensitätsverteilung im Idealfall rein sinusförmig und wurde es auch für jeden Gangunterschied, der durch Bewegung der Spiegel innerhalb weiter Grenzen verändert werden kann, bleiben Abweichungen hiervon treten auf einerseits bei Zusammenwirkung mehrerer Wellen von abweichender Periode, andererseits bei Änderung von Form und Größe der Lichtquelle

Sind zwei Wellen λ_1 und λ_2 vorhanden, so wird bei einer bestimmten Verschiebung d eines Spiegels aus der Nullage (Gangunterschied Null)

$$2d = (m - 1)\lambda_1 = m\lambda_2$$

sein müssen, die Ordnung m der Interferenzen beider Wellenzüge sich um Eins unterscheiden, beide Systeme befinden sich in Konsonanz. Bei weiterer Verschiebung entfernen sich die Maxima für beide Systeme voneinander, bis schließlich die Maxima des einen Systems auf die Minima des andern fallen (Dissonanz), ein Spiel, das sich bei den Natriumlinien nach etwa 1000 Interferenzen wiederholt¹. Geringer Unterschied der Wellenlängen vorausgesetzt, der sich nicht durch Farbunterschiede bemerkbar macht, wurde daher bei kontinuierlicher Änderung des Abstandes d die Sichtbarkeit der Interferenzen, die durch

$$V = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (42)$$

definiert wird², einen Rückschluß auf die Struktur eines Wellenlangengemisches gestatten, das Wellenlängenverhältnis ergibt sich aus dem Abstand der Konsonanzen, das Intensitätsverhältnis aus den Sichtbarkeitswerten. Leider sind die Schlüsse nicht vollkommen eindeutig³, behalten aber als Ergänzung der übrigen Methoden ihren Wert.

Wichtiger und einwandfreier ist die Verwendung zur Bestimmung der Abmessungen einer Lichtquelle. In der Tat hängt bei den von MICHELSON betrachteten Kombinationen, die in Abb. 28 zusammengestellt sind, die Sichtbarkeit noch von den Abmessungen der interferierenden Bündel ab. Betrachtet man eine Anordnung nach Abb. 29 mit wachsendem Abstand der Blendenöffnungen, so findet man, daß an Stelle der bei kreisförmiger Öffnung selbst kreisförmigen Beugungsringe, die das Bild einer kleinen Lichtquelle umgeben, Interferenzstreifen auftreten, deren Sichtbarkeit von der Lage der Durchtrittsöffnungen und der Größe der Lichtquelle abhängig ist und benutzt werden kann, um beispielsweise den Durchmesser von Steinen zu bestimmen oder Doppelsteine zu trennen, die von einfachen Fernrohren auch bei Anwendung stärkster Vergrößerung nicht mehr aufgelöst werden können. Schon FIZEAU⁴ hat auf diese Möglichkeit hingewiesen, die von M. STÉPHAN, MICHELSON und HAMY⁵ behandelt worden ist. Auf den Zusammenhang mit den FRAUNHOFERSchen Beugungserscheinungen

¹ FIZEAU, Ann Chim Phys (3) 66, S. 429 (1862).

² A. A. MICHELSON, Phil Mag (5) 31, S. 338 (1891), 34, S. 280 (1892), J. d. Phys. (3) 3, S. 11 (1894), Trav. et mem. du Bureau intern. de poids et mesures 11, S. 129 (1894).

³ Lord RAYLEIGH, Phil Mag (5) 34, S. 407 (1893). Betr. den von MICHELSON benutzten Apparat zur Darstellung der Sichtbarkeitskurven siehe A. A. MICHELSON u. S. W. STRATTON, ebenda (5) 45, S. 85 (1898). Allgemein siehe J. MACÉ DE LÉPINAY, Travaux d'interférence, Paris 1902.

⁴ l. c. S. 29.

⁵ M. STÉPHAN, C. R. 74 (1873), 78 (1874), M. MICHELSON, Phil Mag (5) 30, S. 1 (1890), M. HAMY, B. A. 16, S. 257 (1899), A. A. MICHELSON, Science (N. S.) 57, S. 703 (1923).

an zwei Spalten weist JANSS¹ hin und zeigt, wie mit einem Fernrohr von 900 mm Objektivbrennweite und 58 mm Objektivdurchmesser der Durchmesser von Planetenscheiben ermittelt werden kann. Hatte MICHFLSON zuerst seinen Messungen die einfache Formel

$$\varepsilon = 1,22 \lambda / l$$

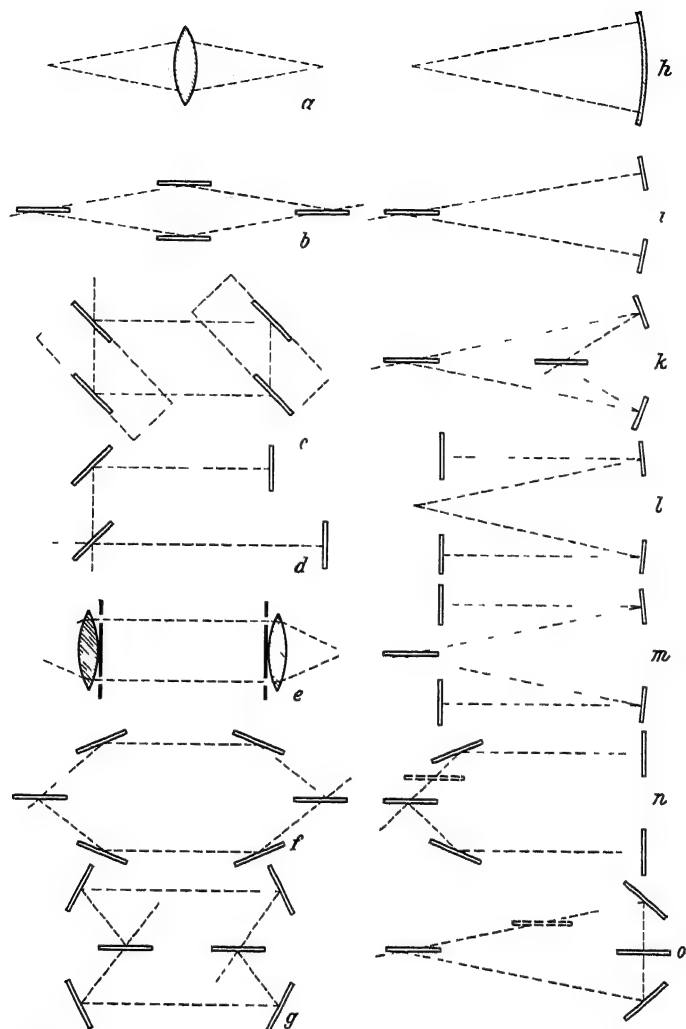


Abb 28 Verschiedene Interferenzanordnungen nach MICHFLSON

zugrunde gelegt, in der ε den Sterndurchmesser, λ die Wellenlänge, l den Abstand der Öffnungen vor dem Objektiv bedeutet, deren Durchmesser als klein gegenüber dem Abstand angenommen wurde, so zeigte HAMY, daß die Berücksichtigung der Spaltbreite unerlässlich ist. In erster Näherung ist bei einem Abstand der Öffnungen l und einem Öffnungsdurchmesser a zu setzen²

$$s = \frac{\lambda}{l} \left(1,22 \pm 0,15 \frac{a^2}{l^2} \right)$$

¹ ZfU Unterrichts 30, S 9, (1923)

² M. HAMY, C.R 173, S 888 (1921), 174, S 904 (1922), 175, S 1123 (1922)

Legt man senkrecht zur Richtung der vor dem Fernrohrobjektiv befindlichen Spalte eine Ebene durch die Objektvachse und bezeichnet den Winkelabstand zwischen dem Mittelpunkt des Sternbildes in der Brennebene und einem ebenfalls in der Brennebene und der oben definierten Ebene gelegenen Punkt P mit Θ , dann wird nach Einführung der Abkürzungen

$$\tau = \frac{2\Theta}{\lambda}, \quad \frac{a}{l} = \alpha, \quad m = \frac{\pi l \varepsilon}{2\lambda}$$

die Intensität im Punkte P

$$J = 2 \int_{-1}^{+1} \sqrt{1 - n^2} \left[\frac{\sin m \alpha (n - \tau)}{m \alpha (n - \tau)} \right]^2 \cos^2 m (n - \tau) dn \quad (43)$$

Bei Entwicklung nach Potenzen von α und Beschränkung auf die zweiten Potenzen erhält man als Lösung

$$m = 1,916 - 1,15 \alpha^2,$$

von der ausgehend man J auch für größere Werte von α zahlenmäßig mit hinreichender Näherung berechnen kann¹

Als allgemeinsten Ausdruck für die in der Richtung Θ , Φ durch ein in der Richtung ω , ψ gelegenes Element erzeugte Intensität gibt SPENCER JONES²

$$J = \iint J^2 \cos^2 \frac{\pi l}{\lambda} (\omega - \Theta) \left[\frac{\sin \frac{\pi a}{\lambda} (\omega - \Theta)}{\frac{\pi a}{\lambda} (\omega - \Theta)} \right]^2 \left[\frac{\sin \frac{\pi h}{\lambda} (\Phi - \psi)}{\frac{\pi h}{\lambda} (\Phi - \psi)} \right]^2 d\omega d\psi \quad (44)$$

Das Integral geht bei Reihenentwicklung nach a/l über in einen Ausdruck von der Form

$$J = \text{const} + f(\Theta) + p^2 \Phi(\Theta),$$

aus dem, wenn der einem Extremwert zugeordnete Wert von Φ für $a/l = 0$ bekannt ist, auch die Koeffizienten für endliche Spaltbreite sich ergeben, so daß schließlich

$$\varepsilon = 1,22 \frac{\lambda}{l} \left\{ 1 + 0,765 \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right\} \quad (45)$$

Bei einem elliptischen Stern, dessen scheinbare Kontur durch

$$a\psi^2 + 2b\psi\omega + c\omega^2 = 1$$

darstellbar ist, ergibt sich der gleiche Wert wie für kreisförmige Scheiben, wenn unter ε der senkrecht zur Spalttrichtung gemessene Halbmesser verstanden wird. Auch für eine Kreisscheibe mit abnehmender Intensität nach dem Rande lassen sich allgemeine Folgerungen ziehen. Für Doppelsterne mit gleicher Größe

¹ M. HAMY, C. R. 176, S. 1849 (1923)

² M. N. 82 S. 513 (1922). In noch allgemeiner Weise entwickelt die Helligkeitsverteilung H. KUHN [Ann. d. Phys. (5) 4, S. 215 (1930)] und kommt zu dem Schluß, daß bei geeigneter Anordnung die Genauigkeit auf das Fünffache erhöht werden kann. Eine Abänderung, bei der zwei weit auseinanderstehende Zolostaten Spiegel benutzt werden sollen, gibt E. H. SYNGE [Phil. Mag. (7) 10, S. 291 (1930)] an. A. DANJON [C. R. 196, S. 1720 (1933)] benutzt ein Interferenzmikrometer, das Okular des Fernrohres wird durch eine Zerstreuungslinse mit JAMINSchem Kompensator ersetzt und das Beugungsbild mit einem kleinen Fernrohr beobachtet. Ein dunkler Streifen zwischen den beiden Bildern verschwindet bei kreisförmiger Öffnung, wenn der scheinbare Durchmesser der Scheibe $1,86 \frac{\lambda}{D}$, oder bei Doppelsternen, wenn der Abstand der Komponenten $0,90 \frac{\lambda}{D}$ ist (D = freie Objektöffnung).

der Komponenten im Abstände η ist das Integral in zwei Teile zu zerlegen, und man findet

$$\eta = \frac{\lambda}{2l} \left[1 + \frac{\pi}{12} \left\{ 1 + \frac{\pi(\pi+4)}{32} \left(\frac{\varepsilon}{a} \right)^2 \right\} \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right]. \quad (46)$$

Die Sichtbarkeitsfunktion ist nach MICHELSON und PEASE

$$V_n(k) = \frac{F(k, n)}{F(0, n)}, \quad F(k, n) = \int_0^1 (1-x^2)^{n+1} \cos kx dx \quad k = \frac{2\pi b R}{\lambda d},$$

wobei b der Abstand der Spiegel, R der Sternradius, d die Sternentfernung und n eine von der Intensitätsverteilung abhängige Zahl ist (Variationskoeffizient für Helligkeitsverteilung). Wie GANS gezeigt hat, ist die Funktion $V_n(k)$ mit Hilfe BESSELScher Funktionen darstellbar in der Form

$$V_n(k) = \pi(n+1) \left(\frac{2}{k} \right)^{n+1} J_{n+1}(k),$$

wodurch die Berechnung außerordentlich erleichtert wird¹.

Nach MICHELSONS Vorschlag läßt sich die für die Genauigkeit des Verfahrens maßgebende Entfernung der Spiegel noch steigern, wenn durch eine gemäß Abb 29 auszuführende Spiegelkombination vor dem Objektiv des Beobachtungsternrohrs die Spalte durch die äußeren Spiegel selbst ersetzt werden

Auf die Anwendung des MICHELSONSchen Interferometers zur Auswertung des Meters in Wellenlängen sei hier nur kurz hingewiesen².

15 Interferenzspektroskop nach LUMMER-GEHRCKE Gegenüber dem MICHELSONSchen Verfahren, welches aus der bei wachsender Dicke der Platten sich ändernden Sichtbarkeit einen Schluß auf die Zusammensetzung eines Wellengemisches zieht, bieten die Interferenzapparate hohe Auflösungsfähigkeit den Vorteil, unmittelbar ein Bild von der Struktur enger Wellenlangenbezirke zu geben. Das Auflösungsvermögen eines spektroskopischen Apparates wird definiert durch

$$1 = \frac{\lambda}{d\lambda}.$$

Da dieses proportional dem Produkt aus der Zahl der interferierenden Bündel und dem Gangunterschied zweier aufeinanderfolgender Teilwellen ist, müssen Planparallelplatten von hinreichender Dicke (genügendem Gangunterschied der Teilwellen) und genügender Zahl der mitwirkenden Bündel eine hohe Auflösungsfähigkeit ergeben, die nur dadurch beeinträchtigt wird, daß das Dispersionsgebiet verhältnismäßig klein ist. Dieses ist dadurch gegeben, daß das Maximum der Ordnungszahl h für die Wellenlänge λ mit dem Maximum der Ordnungszahl $h \pm 1$ für die Wellenlänge $\lambda + d\lambda$ zusammenfällt³.

Bei der von LUMMER benutzten Anordnung (einer Planparallelplatte, deren Brechungsindex höher als derjenige der Umgebung sein muß, weil der Gang-

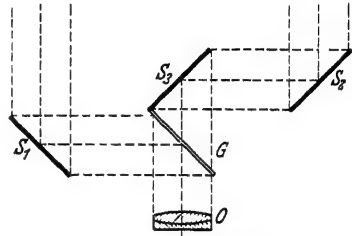


Abb 29 Spiegelanordnung zur Messung von Sterndurchmessern mit Hilfe von Interferenzen

¹ R. GANS, Phys. Z. 25, S. 335 (1924), Contrib. Estud. Cienc. (La Plata) 3, S. 361 (1925)
² G. PEASE, Interferometer Methods in Astronomy, Erg. d. exakten Naturw. X, 1931

³ A. MICHELSON und R. BENOIT, Trav. et mem. du Bureau intern. de poids et mesures 11, S. 40 (1895). Umgehende Darstellung in BERNHARD-SCHULTZ, Technische Längenmessungen,

2. Aufl. Berlin 1929, L. GEHRCKE, Handb. der physik. Optik I, S. 471 ff. Leipzig 1927

³ K. FORTSLING, Lehrbuch der Optik, Leipzig 1928

unterschied aufeinanderfolgender Bündel in Luftplatten nur gering ist) ist das Auflösungsvermögen gegeben durch

$$\frac{2Nd}{\lambda} \sqrt{n^2 - 1}, \quad (47)$$

während für das Dispersionsgebiet gilt

$$\frac{\lambda^2}{2d\sqrt{n^2 - 1}}$$

(N Anzahl der interferierenden Bündel, d Dicke der Platte, n Brechungsindex) Um möglichst scharfe Interferenzen zu erhalten, müssen die Bündel steilend aus



Abb 30 Aufsatzprisma für Planparallelplatten

der Platte austreten, wodurch freilich die Zahl der interferierenden Bündel etwas eingeschränkt wird und die theoretische Auflösungsstärke noch von der Länge der Platte abhängig wird. Bei großem Einfallswinkel beträchtliche Verlust bei der ersten Reflexion ist von GEHRCKE durch Aufsetzen eines Prismas auf die Platte vermieden worden¹ (Abb 30). Durch geeignete Form des Prismas gelingt es, noch Austrittswinkel von 88° zu benutzen, und es ist möglich, den Reflexionskoeffizienten noch dadurch zu steigern, daß man parallel zur Einfallsebene polarisiertes Licht einfallen läßt (s. ZEEMAN-Effekt).

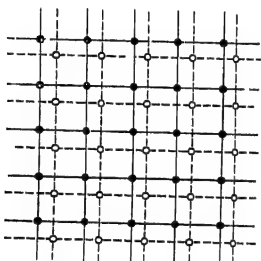


Abb 31 Interferenzpunkte bei gekreuzten Platten

Naturngemäß ist es von größter Wichtigkeit die Flächen einwandfrei eben und parallel zu machen² ebenso müssen hohe Anforderungen an die Homogenität des Glases gestellt werden. Wenn es auch gelungen ist, leistungsfähige Platten herzustellen (B. Halle Nchl Steglitz, A. Hilger, London, C. Zeiss, Jena), so ist es doch wichtig, durch die Methode der gekreuzten Platte eine einwandfreie Unterscheidung zwischen wirklich auftretenden Linien und „Geistern“, deren Auftreten durch Plattenfehler bedingt ist, treffen zu können.

Zwei hintereinander gestellte, zueinander geneigte Platten geben an Stelle der kreisförmigen Interferenzstreifen Interferenzpunkte, deren Einzelsysteme bei reellen Linien diagonal gegeneinander verschoben sind (Abb 31), Geister liegen auf den Verbindungslinien der Punkte eines Systems³.

16 PEROT-FABRYSche Platte Die für das Zustandekommen scharfer Interferenzen notwendigen hohen Werte der Reflexionskoeffizienten können auch

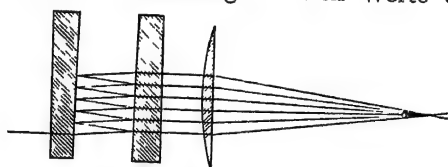


Abb 32 PEROT-FABRY-Platte

erreicht werden, wenn man die Reflexionsflächen mit schwach durchsichtigen Metallüberzügen versieht. Man wählt hierfür meist die Innenflächen zweier leicht keilförmiger Platten (Abb 32). Die Anzahl der interferierenden Bündel hängt nur noch ab von dem Reflexionskoeffizienten, ihr Durchmesser

von demjenigen der Platten, solange die Neigung des einfallenden, meist parallelen Strahlenbündels gegen die Normale der Flächen klein ist. Die Interferenzen

¹ O. LUMMER u. E. GEHRCKE, Sitzber. K. Akad. Wiss. Berl. 1902, S. 11, Ann. d. Phys. (4) 10, S. 457 (1903); M. ADAM, Z. f. techn. Phys. 14, S. 26 (1933).

² Bei einem Keilwinkel von etwa 1' ergeben sich noch scharfe Interferenzstreifen. E. GEHRCKE u. L. JANICKI, Ann. d. Phys. (4) 39, S. 335 (1912).

³ E. GEHRCKE u. O. V. BÄDYER, Ann. d. Phys. (4) 20, S. 269 (1906), s. auch H. SCHULZ, Phys. Z. 12, S. 1211 (1911).

entstehen bei parallelem Licht als ein System konzentrischer Kreise in der Biennebene einer hinter den Platten eingefügten Linse¹. Wegen des veränderlichen Abstandes ist auch das Auflösungsvermögen, für das sich der Wert $A = \frac{2Nd}{\lambda}$ ergibt, veränderlich, ebenso das Dispersionsgebiet, das mit $\Delta\lambda = \lambda^2/2d$ kleiner ist als das der LUMMER-GEHRCKE-Platte. Der Bequemlichkeit der Handhabung wegen werden jedoch, vor allem für Feinstrukturuntersuchung von Spektrallinien, Platten mit konstantem Abstand (Etalons) benutzt, die Einzelplatten werden durch einen Ring aus Invar oder Indilatanstahl, zuweilen auch durch Ringe aus geschmolzenem Quarz in richtiger Stellung gehalten². Zu beachten ist, daß wegen des Phasensprunges an der Silberschicht die optische Dicke einer solchen Kombination sich von Wellenlänge zu Wellenlänge ändert. Zur Bestimmung der Dicke und damit auch der Ordnungszahl sind verschiedene Verfahren benutzt worden, die teils auf der Bestimmung des „Streifenüberschusses“, teils auf der Beobachtung der Koizidenzen beruhen, d. h. derjenigen Stellen, an denen die Maxima verschiedener Wellenlängen zusammenfallen³.

Ist p_1 die Ordnungszahl des ersten Ringes für eine bestimmte Wellenlänge λ_1 , so gilt für das Ringzentrum $p_0 = p_1(1 + \varepsilon_1)$ und entsprechend für eine zweite Wellenlänge λ_2 beim ersten Ring dieses Systems eine Ordnungszahl des Ringzentrums von $p_2(1 + \varepsilon_2)$, so daß aus dem System von Gleichungen

$$\begin{aligned} 2d &= p_0\lambda_1 = p_1(1 + \varepsilon_1)\lambda_1 = p_2(1 + \varepsilon_2)\lambda_2 = p_3(1 + \varepsilon_3)\lambda_3 \quad , \\ p_2 + \varkappa_2 &= (p_1 + \varkappa_1)\lambda_1/\lambda_2, \\ p_3 + \varkappa_3 &= (p_1 + \varkappa_1)\lambda_1/\lambda_3, \\ p_1 + \varkappa_1 &= (p_1 + \varkappa_1)\lambda_1/\lambda_1 \end{aligned}$$

bei annähernd bekannter Dicke d der Luftschicht und genau gemessenen Überschüssen $\varkappa_v = p, \varepsilon$, die Ordnungszahlen und damit auch die Dicke gefunden werden können. Laßt sich diese Methode vorwiegend bei verhältnismaßig geringen Wellenlängendifferenzen verwenden, so erfordert die Methode der Koizidenzen, die vorwiegend für metrologische Zwecke in Frage kommt, meist größere Wellenlängendifferenzen, weil durch das Auftreten von Mischfarben bestimmter Art (Heliumlicht) die Erkennung der Koizidenzen erleichtert wird.

Durch Kombination zweier Platten erzielt man, wie GEHRCKE und LAUR⁴ nachgewiesen haben, eine Verschärfung der Interferenzen, wie schon daraus geschlossen werden kann, daß die Zahl der interferierenden Bündel erhöht wird. Formelmaßig ergibt die Erweiterung auf drei reflektierende Flächen

$$I_2 = \frac{(1 - \mu^2)^3}{\left| (1 - \mu^2)^2 + 4\mu^2 \sin^2 \frac{\omega\beta}{2} \right|^2}, \quad (48)$$

oder bei drei Platten gleicher Dicke, die sich berühren (vier Flächen),

$$I_3 = \frac{(1 - \mu^2)^4}{\left| (1 - \mu^2)^2 + 4\mu^2 \sin^2 \frac{\omega\beta}{2} \right|^3} \quad (49)$$

¹ A. BOULOUCH, J de Phys (5) 2 S 316 (1893), CH. FABRY u. A. PEROT, Ann Chim Phys (7) 12, S 459 (1897) 16 S 115 (1899) 22, S 561 (1901)

² I. GOOS, Z f Instik 32, S 326 (1912). Neuerdings ist von H. NAGAOKA und I. MITSUUMA [Proc Imp Acad Tokyo 2, S 156 (1926)] vorgeschlagen worden, die PEROT-FABRY-Platte mit einem Prisma konstanter Ablenkung zu vereinigen. Man schneidet das Prisma so daß die Strahlen nach der Totalreflexion die neue Einstrahlungsebene senkrecht treffen und auch senkrecht in den abgeschnittenen Teil hineingehen. Der Abstand wird durch drei Quarzstücke konstant gehalten.

³ MACÉ DI LÉPINAY, Ann Chim Phys (6) 10 (1887) (7) 11 (1897) A. A. MICHELSON u. R. BINONI, J de Phys (3) 7, S 57, PEROT u. FABRY, Ann Chim Phys (7) 16 (1899)

⁴ Z f techn Phys 8, S 157 (1927)

Nun läßt sich aber bei solchen Kombinationen, für die man am besten außen-seitig versilberte Glas- oder Quarzplatten wahl, noch etwas weiteres erzielen eine Erhöhung der Auflösungsfähigkeit ohne Verminderung des Dispersionsgebietes, wenn die Platten mit verschiedener Dicke gewählt werden¹. Die als Dispersionsdifferenzstreifen bezeichneten Interferenzen erklären sich wie folgt: Eine Welle bestimmter Richtung kann nur dann durch beide Platten hindereinander hindurchgehen, wenn beide für denselben Winkel Maxima ergeben. Wenn also der zweite Etalon z. B. dreimal so dick ist wie der erste, so wurden in den gleichen Winkelbereich des dickeren Etalons dreimal soviele Streifen fallen wie beim ersten, von denen aber nur jeder vierte Streifen durchgelassen wird. Dabei wurde aber Bedingung sein, daß die Dicke der beiden Platten so gewählt ist, daß wirklich für einen Winkel eine strenge Koinkidenz erzielt wird. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens solcher vollkommener Koinkidenzen ist bei gebrochenen Werten des Dickenverhältnisses groß, und zwar scheint besonders geeignet ein Dickenverhältnis von $n \pm 0,30$, am besten 1,7².

Bei einer solchen, von LAU als Multiplex-Interferenzspektroskop bezeichneten Kombination ist das theoretische Auflösungsvermögen vollkommen erreicht worden, dessen Werte für einige Interferenzapparate hoher Auflösungsfähigkeit in folgender Tabelle zusammengestellt sind.

Tabelle 5

Interferenzapparat	Zahl der interferierenden Buschel	Auflösungsvermögen
LUMMER-Platte		
Dicke 5 mm	17	340 000
" 10 "		680 000
PEROT-FABRY-Platte Reflexionsvermögen 9,5%		
5 mm Abstand	40	800 000
10 " "		1 600 000
Multiplex-Interferenzspektroskop		
5,9 und 10 mm	200	2 400 000
16,8 und 28,6 mm		6 900 000

Der Unterschied der Leistungsfähigkeit ist gut zu ersehen aus Abb. 33, die oben das Ringsystem einer PEROT-Platte von 5,0 mm Dicke, unten dasjenige einer Platte von 2,94 mm, in der Mitte aber die Wirkung beider Platten angibt. Gegenüber der dickeren Platte ist das Dispersionsgebiet fünffach vergrößert, gegenüber der kleineren dreimal, was mit der theoretischen Forderung vollkommen übereinstimmt, denn die Abstände der Ringsysteme wurden für den vorgegebenen Fall durch die Zahlenfolgen

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
 0 1,7 3,4 5,1 6,8 8,5 10,2 11,9 13,6 15,3

bestimmt, deren obere für die dickere, deren untere für die dünnere Platte gilt.

Der allgemeine Aufbau für ein Multiplex-Interferenzspektroskop ist in Abb. 34 wiedergegeben. Das vom beleuchteten Spalt S_1 ausgehende Licht wird durch das Kollimatorobjektiv parallel gemacht, durchsetzt dann die für die Aussonderung des Dispersionsgebietes notwendige Prismenkombination, für die zwei Prismen

¹ E. LAU, Z f Phys 63, S 313 (1930) s. auch W. HOUSTON, Phys Rev (2) 29, S 478 (1927).

² E. LAU, Phys Z 31, S 973 (1931), Ann d Phys (5) 10, S 71 (1931), E. LAU u. E. RITTER, Z f Phys 76, S 190 (1932), E. PAULS, Phys Z 33, S 405 (1932), P. H. VAN CITTERI, Ann d Phys (5) 13, S 753 (1932). Über Steigerung der Leistungsfähigkeit allgemein siehe E. LAU, Z f Instr 49, S 57 (1929).

konstanter Ablenkung aus schwerem Flint genügen (für Untersuchungen im UV Prismen aus Quarz), und gelangt dann zu dem Objektiv, daß das Spektrum auf dem Spalt S_2 abbildet, die folgende Anordnung ist das einfache Interferenzspektroskop mit dem Multiplexplattensatz J und der Kamera K . Eine Vereinfachung ist möglich, indem Prismenkombination P und Multiplex-Interferenz-

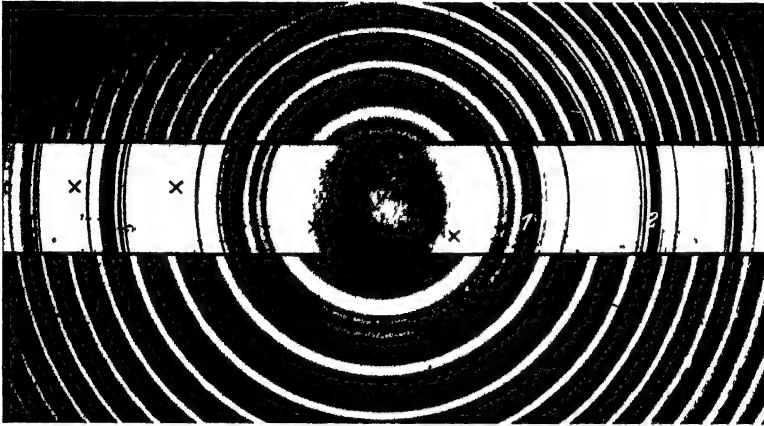


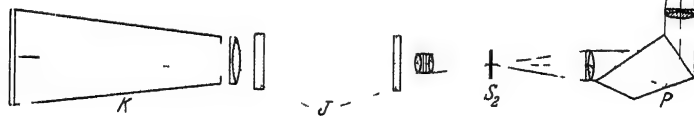
Abb 33 Vergleich des Dispersionsgebietes des Multiplex-Interferenzspektroskops (Mitte) mit den Dispersionsgebieten der Einzelplatten

spektroskop J unmittelbar hintereinander aufgestellt werden. Durch diese Anordnung, bei der Vorzerlegung und Apparat hoher Auflösungsfähigkeit zusammengezogen sind, werden unnötige Lichtverluste infolge Verminderung der Zahl der vom Licht zu durchlaufenden Flächen so weit vermieden, daß selbst bei relativ schwachen Lichtquellen noch eine ausreichende Lichtstärke erzielt wird¹.

Das ebenfalls zu den Interferenzapparaten hoher Auflösungsfähigkeit zu rechnende Stufengitter stellt eine Kombination von Beugungsgitter und Interferenzapparat dar, für welche die Intensitätsverteilung sich aus den bereits angegebenen Ausdrücken (39) bis (41) durch Hinzufügung eines die Beugungswirkung kennzeichnenden Faktors ergibt. Es ist², wenn die Stufenbreite 1 , der durch die Beugung bedingte Gangunterschied $a = n \sin i - \sin i'$ ist,

$$I = \left| \frac{\sin\left(\pi \frac{Ia}{\lambda}\right)}{\pi \frac{Ia}{\lambda}} \right|^2 \frac{(1 - \mu'^2)^2 + 4\mu'^2 m^2 \frac{\omega\beta}{2}}{(1 - \mu^2)^2 + 4\mu^2 m^2 \frac{\omega\beta}{2}} \quad (50)$$

Abb 34 Interferenzspektrograph mit getrennter Vorzerlegung



Das Auflösungsvermögen des Stufengitters ist unabhängig von der Stufenbreite, nur bedingt durch die Zahl der Stufen und die Dicke d der einzelnen Glasplatten

¹ H. SCHULZ, Zf Instik 53, S. 349 (1933)

² O. LUMMER, Wiss. Abh. d. Physik. Techn. Reichsanst. 4, Heft 1 (1904), A. A. MICHELSON, Ap J 8, S. 36 (1896), J. de Phys. 8, S. 305 (1899)

sowie durch den Brechungsindex n , und zwar ist

$$\Delta l = \frac{N d (n - 1)}{\lambda^2},$$

das Dispersionsgebiet

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{d(n-1)}$$

17 Interferenzen durch mehrere Platten Prüfung optischer Systeme

Sind die vorbeschriebenen Interferenzapparate für die spektroskopische Untersuchung geeignet, so ist das Anwendungsgebiet der folgenden Erscheinungen vorwiegend die Feststellung von Gangunterschieden in Systemen, die ihrer Natur nach anderen Zwecken dienen sollen, und zwar kann es sich einerseits darum handeln, geringfügige Dicken- oder Brechungsindexänderungen zu bestimmen oder die Wirkungsweise von Abbildungssystemen (Abbildungsfehler von Objektiven) zu ermitteln

Als älteste der hierher gehörigen Anordnungen ist die von BREWSTER beschriebene zu betrachten¹, stellt man zwei Glasplatten von gleicher Dicke hintereinander unter einem gewissen Winkel zueinander geneigt auf, so entstehen mehrere Bündel 1, 2, 3, 4, 5, 6, die sämtlich miteinander interferieren können. Bei vollkommener Parallelstellung würde der Gangunterschied der Strahlen 2 und 3 einerseits, der Strahlen 5 und 6 andererseits, für jeden beliebigen Einfallswinkel Null sein. Bei gegeneinander geneigten Platten hängt er vom Einfallswinkel ab, und die entstehenden Interferenzstreifen liegen um so weiter auseinander, je kleiner der Winkel ist, den die Platten miteinander bilden. Wegen der geringen Größe der Gangunterschiede bei schwacher Plattenneigung sind die Interferenzen auch im weißen Licht zu beobachten. Selbst bei ungleich dicken Platten können infolge von mehrfachen Reflexionen unter bestimmten Bedingungen gleichfalls Interferenzen im weißen Licht beobachtet werden. Es möge ein Strahl in der Platte G (Abb. 35) $2m$ -Reflexionen, in der Platte G' hingegen $2m'$ -Reflexionen erleiden, ein anderer kohärenter Strahl erfahre dagegen $2p$ Reflexionen in G

und $2p'$ Reflexionen in G' . Ist dann der Gangunterschied beispielsweise für senkrechten Einfall in der ersten Platte D , in der zweiten D' , so ist der Gangunterschied der beiden Strahlen

$$(p - m)D + (p' - m')D' = l,$$

der gleich Null wird, wenn

$$\frac{D}{D'} = - \frac{p' - m'}{p - m},$$

oder, da die Gangunterschiede, gleichen Brechungsindex in den Platten vorausgesetzt, proportional den Dicken d und d' sind

$$\frac{d}{d'} = - \frac{p' - m'}{p - m}$$

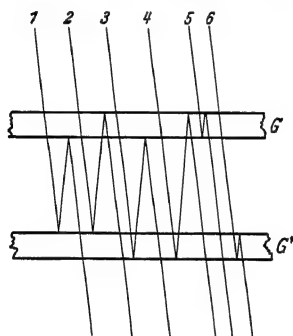


Abb. 35 BREWSTERSCHE Interferenzen

Es gibt somit eine Fülle verschiedener Kombinationen, bei denen solche Interferenzen auftreten können, zumal ja bei verschiedenem Brechungsindex und endlicher Neigung der relative Gangunterschied noch mit der Neigung veränderlich ist, wodurch sich die verschiedenartigsten Formen von Interferenzkurven ergeben, die eingehender von KETTELER u. a. behandelt worden sind²

¹ Edinb. R. S. Trans. 7, S. 435 (1817)

² E. KETTELER, Beobachtungen über die Farbenzerstreuung in Gasen. Bonn 1865, L. ZEHNDER, Wied. Ann. 34, S. 91 (1888), E. SCHMIDT, ebenda 46, S. 1 (1892)

Die von PEROT und FABRY bei der Auswertung des Meters benutzten Überlagerungsstreifen (franges de superposition) sind eng verwandt mit den BREWSTERschen Streifen¹, und auch die von LUMMER² im Anschluß an MASCAR³ behandelte Erscheinung läßt sich auf den BREWSTERschen Fall zurückführen, wie Abb 36 erkennen läßt. Die Form der Interferenzstreifen ändert sich mit dem Neigungswinkel der Platten, und zwar treten bei kleinen Winkeln nahezu kreisförmige Ellipsen auf, die mit größerer Neigung flacher werden, bei bestimmter Stellung in gerade Linien und schließlich in Hyperbeln übergehen.

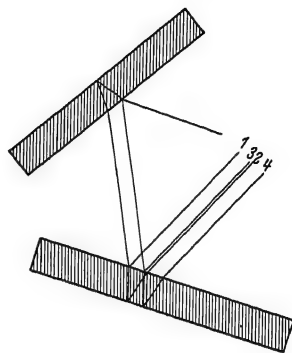


Abb 36 Interferenzen bei geneigten Platten gleicher Dicke

WAEIZMANN⁴ entwickelt aus der MASCAR-LUMMERschen Anordnung, die nur eine Platte benötigt, eine Methode zur Untersuchung von Linsen und Linsensystemen auf Abbildungsfehler. Ein auf die Platte *P* (Abb 37) fallender Strahl *AB* wird durch *P* in zwei Strahlen zerlegt, die durch die Linse *L* im Brennpunkte *F* vereinigt werden und nach Reflexion an einem in der Brennebene senkrecht zur Linsenachse stehenden Spiegel (Nullstellung) wieder durch die Linse zum Spiegel zurückgelangen. Wenn die Linse frei von Abbildungsfehlern ist, so ist der Gangunterschied der austretenden Strahlen Null, und das Gesichtsfeld erscheint gleichmäßig hell, bei Verschiebung des Spiegels aber weisen die austretenden Strahlen einen bestimmten Gangunterschied auf, und es entwickelt sich eine ausgedehnte Interferenzerscheinung, die der JAMINSchen nahe verwandt ist.

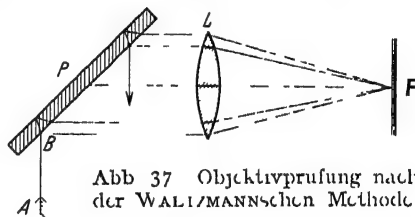


Abb 37 Objektivprüfung nach der WALZMANNschen Methode

Der Ort der Interferenzen ist, wie theoretisch und experimentell nachweisbar ist, in unmittelbarer Nähe der Brennebene des Linsensystems zu suchen, bei nichtkorrigierten Systemen sind auch in der Nullstellung des Spiegels Interferenzen vorhanden, die bei Verschiebung des Spiegels nicht mehr symmetrisch zur Nullstellung sind. Sphärische Unterkorrektur oder Überkorrektur ändert bei gleicher Bewegungsrichtung des Spiegels die Interferenzen im entgegengesetzten Sinne. Ein Maß für die Größe der sphärischen Fehler bildet die Krümmung der Streifen, Auftreten eines Wendepunktes kennzeichnet den Übergang von Unterkorrektur zu Überkorrektur in der zugeordneten Zone.

Eine genaue Verfolgung auch der räumlich verlaufenden Strahlen ergab, daß die Interferenzerscheinung unter Berücksichtigung von Strahlen beliebiger Neigung gleichabständige senkrechte Streifen gibt, wenn die Bedingungen erfüllt sind, die die Vernachlässigung höherer Winkelpotenzen zulassen, wenn nämlich aus größerer Entfernung mit kleiner Eintrittspupille beobachtet wird⁵.

Nähere Angaben über die Abänderungen bei schräger Stellung der Linse, also bei Einwirkung außeraxialer Fehler, von denen in erster Linie Koma,

¹ H. FABRY u. A. PEROT, Ann. Chim. Phys. (7) 12, S. 175 (1897); ebenda 16, S. 331 (1899), 22, S. 572 (1901).

² Wied. Ann. 24, S. 417 (1885).

³ Ann. Chim. Phys. (4) 23, S. 146 (1871).

⁴ Ann. d. Phys. (4) 39, S. 1042 (1912).

⁵ J. BRAUER, Inaug.-Diss. Breslau 1922; L. BRAUER u. L. WALZMANN, Ann. d. Phys. (4) 72, S. 501 (1923).

Astigmatismus und Bildfeldkrümmung in Frage kommen, hat E HABERLAND¹ gemacht. Trotz der unübersichtlichen Formeln gelingt es, für die ihrem Wesen nach gleichbleibende Erscheinung Ausdrücke zu finden, die in verhältnismäßig einfacher Weise die wichtigsten Größen zu ermitteln gestatten, wobei selbstverständlich Vorbedingung ist, daß die zur Auswertung notwendigen Beobachtungen oder Aufnahmen im homogenen Licht gemacht werden. Durch Abänderung der Wellenlänge sind dann die chromatischen Fehler zu bestimmen.

Eine gleichen Zwecken dienende Methode hat unter Benutzung der MICHELSONSchen Anordnung TWYMAN² entwickelt. Fügt man in den Strahlengang Abb 27 zwischen Glasplatte G_1 und Spiegel S_1 das zu prüfende optische System, gegebenenfalls unter Neigung des letzteren oder bei Linsensystemen unter Ein-
satz des ebenen Spiegels durch einen Kugelspiegel ein, so wurden bei einem idealen System wieder die Interferenzen der dünnen Blättchen entstehen, die durch Abbildungsfehler oder Flächenfehler entsprechend deformiert werden. Der Ort der Interferenzen scheint in dem System zu liegen, und es können somit die Abbildungsfehler sofort nach der Zugehörigkeit zu einer bestimmten Zone lokalisiert werden.

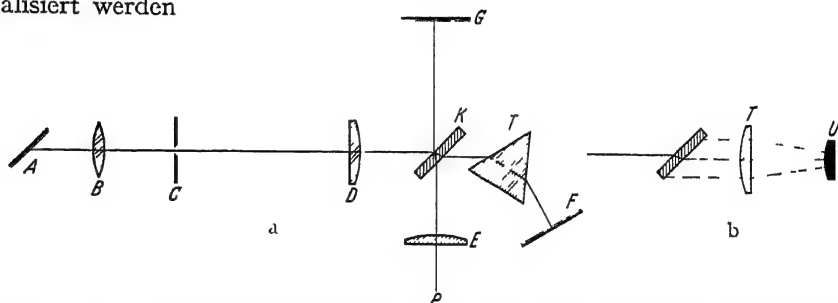


Abb 38a u b TWYMANsches Interferometer zur Untersuchung von Linsen und Prismen

Die für Prismen und Linsen gewählten Ausführungen sind in Abb 38a und b schematisch dargestellt. Durch Spiegel A und Linse B wird das Licht einer Quecksilberdampflampe auf der Blende C konzentriert, durch die Linse D parallel gemacht und fällt auf die ruckseitig versilberte Platte K. Der eine Teil des Lichtes kommt über den Spiegel G, die Platte K und die Linse L zum Auge des Beobachters bei P. Der andere Teil des Lichtes durchsetzt das Prisma oder die Linse T und wird durch den Planspiegel F oder den Kugelspiegel U (Abb 38b) wieder auf dem Wege über die Platte K dem Beobachter zugeleitet. R oder U sind in einem kreisförmigen Schlitz verschiebbar, U ist überdies noch zur Anpassung an die Brennweite des zu untersuchenden Systems in der Strahlrichtung zu verstellen.

Vorschriften für die quantitative Auswertung der Aufnahmen gibt KINGSLAKE³, nach dem für Punkte der X-Achse der Gangunterschied, dessen Vorzeichen durch leichten Druck auf den hinter der Linse befindlichen Spiegel erhalten wird, dargestellt werden kann durch

$$\left. \begin{aligned} D \pm n \frac{\lambda}{2} &= Ax_0^4 + Bx_0^2 + C, \\ \text{während für die Y-Achse gilt} \\ D \pm n \frac{\lambda}{2} &= Ey_0^4 + Fy_0^2 + Gx_0^2 + Hy_0 \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

¹ Z f Phys 24, S 285 (1924)

² Phil Mag 35, S 49 (1918), Trans Opt Soc London 22, S 8 (1921), 24, S 189 (1923), Z f Wiss Phot 22, S 131 (1924), s auch A KÖNIG, Abschn Fernrohr Ziff 63

³ Trans Opt Soc London 27, S 95 (1925/6), 28, S 1–20 (1926/7)

Aus den gemessenen Streifenabständen wird dann nach der Methode der kleinsten Quadrate der Wert der Koeffizienten A, B, C , berechnet, aus denen dann bei gegebener Brennweite f und Einfallshöhe h die vorhandene Größe der Abbildungsfehler gefunden wird nach

$$\left. \begin{aligned} A = E &= \frac{a_1}{4}, & B &= \frac{1}{2} \left(\frac{h}{f} \right)^2 a_3 + \frac{1}{2f^2} \delta l, & C &= \frac{1}{f} \delta t, \\ F &= \frac{h}{f} a_2, & G &= \frac{3}{2} \left(\frac{h}{f} \right)^2 a_3 + \frac{1}{2f^2} \delta l, & H &= \frac{1}{f} \delta h, \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

wobei die sphärische Aberration durch a_1 , Koma durch a_2 , Astigmatismus durch a_3 und die Verzeichnungsfehler durch δl , δt und δh gegeben sind. Der von KINGSLAKE gezogene Schluß „The use of the interferometer method is the detection and figuring of irregularities in surfaces and glasses, and in the visual detection of aberrations in a qualitative, or roughly quantitative, way“ dürfte trotz der entgegenstehenden Ansicht von SMITH¹ gerechtfertigt sein. Jedenfalls ist die HARMANNsche Methode für quantitative Messungen überlegen, obwohl die von KINGSLAKE ermittelten Vergleichswerte bei beiden Methoden eine in Anbetracht der Schwierigkeiten noch ertraglich zu nennende Übereinstimmung ergeben. Für die Koeffizienten a_2 und a_3 folgt

Koeffizienten	Interferometer	HARMANN
a_2	0,001 580	0,001 752
a_3	0,012 44	0,015 98

c) Beugung

18 Allgemeine Grundlagen² Die Gebiete der Polarisation und Interferenz des Lichtes können bei Annahme des Vorhandenseins von Transversalwellen auch dann behandelt werden, wenn über das Wesen der Lichtausbreitung keine besonderen Voraussetzungen gemacht werden, sondern zunächst an die elementaren Vorstellungen der geradlinigen Ausbreitung und der Unabhängigkeit der Lichtstrahlen, also der einzelnen räumlich benachbarten Teile eines Lichtstromes, angeknüpft wird. Es bedarf aber strenggenommen in allen Fällen, vorzüglich aber dann, wenn die Ausbreitung des Lichtes durch Blenden oder Schirme behindert wird, deren Abmessungen sich der Größenordnung der Lichtwellenlänge nähern, noch einer Begründung für die Zulässigkeit der erwähnten, für die geometrische Optik wesentlichen Annahmen, die das Auftreten von Beugungserscheinungen ausschließen wurden, da diese ja eist bei Abweichungen von der geradlinigen strahlenmäßigen Ausbreitung des Lichtes möglich werden.

Die älteste, von HUYGENS vertretene Auffassung betrachtet jedes von der Welle erreichte und durch sie zu Schwingungen angeregte Teilchen als Ausgangspunkt neuer Wellen, aus deren Gesamtwirkung sich die weitere Lichtwirkung ableiten läßt, wobei die Annahme gemacht wird, daß nur an jenen Stellen eine merkbare Wirkung auftreten kann, die von mehreren Elementarwellen erreicht werden, d. h. auf der einhüllenden Fläche. Sie begründet damit die geradlinige Ausbreitung und schließt das Auftreten merklicher Intensitäten außerhalb des geometrischen Schattens, das Vorhandensein von Schwankungen der Intensität innerhalb des von Licht erfüllten Raumbereiches aus. Erst die von FRESNEL

¹ Trans Opt Soc London 28, S 104 (1926/7), S. BUIKOW, Z f. Phys 30, S 268 (1924).
Ableitung der Fehlerausdrücke aus dem Eikonalg. C. C. STILWART, Proc Cambr Phil Soc 24, S 166 (1928). Abänderung für Systeme mit großem Durchmesser O. S. HAY, Trans Opt Soc 31, S 91 (1929/30).

² L. JENZSCH, Handwörterbuch der Naturw. 6. Jena 1931.

eingeführte Verbindung des HUYGENSSchen Prinzips der Elementarwellen mit dem Interferenzprinzip konnte nachweisen, daß die Intensitätsverteilung hinter einem die Lichtausbreitung hindernden Körper zwar durch dessen Stellung und Größe bedingt ist, aber besonders an den Schattengrenzen noch durch die Lichtwellenlänge bestimmt wird

Den einfachsten Weg zur Beurteilung der Ablenkung des Lichtes vom geradlinigen Wege bei Querschnittsbegrenzung bietet die FRESNELSche Zonenkonstruktion. Gehen von einer als punktförmig angenommenen Lichtquelle Q Wellen

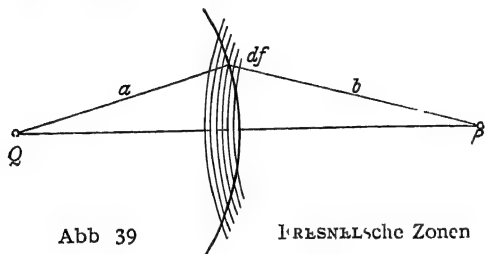


Abb 39

FRESNELSche Zonen

aus (Abb 39), so treffen diese zu einer bestimmten Zeit t auf einer Kugelfläche a ein und erregen hier eine Schwingung, deren Amplitude s gegeben ist durch

$$s = \frac{A}{a} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{a}{\lambda} \right),$$

wobei λ die Wellenlänge, A die Amplitude in der Entfernung 1 von Q , T die Schwingungsdauer bezeichnet

Die von einem Element df der Kugelfläche nach einem Punkt P gelangende Strahlung ist abhängig von dem Abstand b des Elementes df von P sowie von der Neigung ξ der Normalen von df gegen die Richtung des nach P gelangenden Teiles der Elementarwelle. Über die die Amplitudenänderung ergebende Winkel-funktion $k = \varphi(\xi)$ ist eine bestimmte Aussage zunächst nicht erforderlich.

Teilt man nun die Kugelfläche in der Weise in ringförmige Zonen, daß für die Teilpunkte M_0, M_1, \dots, M_n , welche die Lage des Elementes df kennzeichnen, stets $M_n P - M_{n-1} P = \frac{\lambda}{2}$ ist, so folgt für die Lichtwirkung der n ten Zone, wenn $M_0 P = b$ ist,

$$s_n = 2\pi \frac{A}{a + b} \int_{b + \frac{n-1}{2}\lambda}^{b + \frac{n}{2}\lambda} k_n \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{a + r}{\lambda} \right) dr \quad (53)$$

Bei hinreichender Größe von a und b und genügend kleinen Wellenlängen findet man als Gesamtwirkung einer endlichen Anzahl von Zonen die Wirkung der Hälfte der ersten und der letzten Zone, und wenn für diese die Ausstrahlung nach P senkrecht erfolgt, wegen $k_n = 0$ nur die Wirkung der ersten halben Zone, wodurch bewiesen sein wurde, daß bei ungestörter Ausbreitung des Lichtes, abgesehen von einer Phasendifferenz von $\pi/2$, die Schwingung am Orte P dieselbe sein mußte, wie die durch Vermittlung der Elementarwellen bedingte.

Die allgemeinen Folgerungen aus dieser in verschiedener Hinsicht unvollkommenen Theorie finden Bestätigung durch den Versuch, so vor allem durch die Tatsache, daß bei unveränderter Stellung von Lichtquelle und Aufpunkt P eine symmetrisch zu QP gelegene kreisförmige Öffnung bei wachsender Größe abwechselnd, je nach der Zahl der in ihr enthaltenen FRESNELSchen Zonen, Maxima und Minima ergibt.

Ausgangspunkt für eine bessere Formulierung bildet die für alle Wellenvorgänge geltende Gleichung

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \Delta \Phi, \quad (54)$$

aus der bei Anwendung des GREENSchen Satzes der von KIRCHHOFF aufgestellte Ausdruck sich ergibt

$$4\pi \Phi(P) = \int_S \left\{ \frac{1}{r} \left[\frac{\partial \Phi}{\partial n} \right] - \cos(n, r) \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\Phi}{r} \right) \right\} dS \quad (55)$$

Bedingung für die Lösbarkeit der Gleichung ist die Kenntnis der Funktionen Φ und $\partial\Phi/\partial n$ auf einer geschlossenen Fläche S , für die zulässige Annahmen nur gemacht werden können, wenn die Wellenlängen hinreichend klein sind, wie dies für Lichtwellen zutrifft. Eine Näherungslosung gibt jedenfalls das Ausbreitungsgesetz der Kugelwellen richtig wieder, ferner findet man an Stelle der willkürlichen Größe k bei KIRCHHOFF die Funktion

$$k = \frac{1}{2} [\cos(n, r_1) - \cos(n, r_0)] \quad (56)$$

Für die Behandlung konkreter Aufgaben wird meist angenommen, daß die genannten Funktionen Φ und $\partial\Phi/\partial n$ innerhalb der beugenden Öffnung dieselben Werte haben, wie sie am gleichen Ort bei ungestörter Ausbreitung der Welle sich ergeben, feiner wird als Integral der Wellengleichung der Ausdruck

$$\frac{1}{r} \cos \frac{2\pi}{T} (t - \frac{r}{c}) \quad (57)$$

eingesetzt, und meist werden die Abmessungen der beugenden Öffnungen so klein gewählt, daß die die Ausstrahlung bestimmende Größe k innerhalb der Öffnung als konstant angesehen werden kann. Nur der Fall der Beugung an einer unendlich ausgedehnten (leitenden) Halbebene ist in volliger Strenge durchgeführt worden¹.

Bei den erwähnten einschränkenden Annahmen folgt dann für die durch eine punktförmige Lichtquelle $Q = x_1, y_1, z_1$ hinter einer beugenden Öffnung in einem Punkt $P = x_0, y_0, z_0$ erzeugte (Abb 40) Erregung

$$u_p = \frac{A}{2\lambda} \frac{\cos(n, r_0) - \cos(n, r_1)}{r_0 r_1} \int \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_0 + r_1}{\lambda} \right) dO, \quad (58)$$

wobei r_1 und r_0 die Entfernungen der Punkte Q und P von dem Punkt (x, y) der in der X, Y -Ebene liegenden beugenden Öffnung sind. Die Integration mußte über eine den Ort des Beobachters umschließende Fläche ausgeführt werden, doch genügt es, sie auf die Fläche der beugenden Öffnung selbst zu beschränken, weil gemäß Voraussetzung die Lichterregung in allen Punkten außerhalb der Öffnung verschwindet.

Entwickelt man die Größen r_0 und r_1 nach Potenzen der als klein angenommenen Koordinaten x, y , so ergibt sich, wenn die Entfernungen der Punkte Q und P vom Koordinatenanfangspunkt mit ϱ_1 und ϱ_0 bezeichnet werden und abkürzend für die Richtungskosinus gesetzt wird

$$\begin{aligned} \frac{x_1}{\varrho_1} = \alpha_1, \quad \frac{y_1}{\varrho_1} = \beta_1, \quad \frac{z_0}{\varrho_0} = \alpha_0, \quad \frac{y_0}{\varrho_0} = \beta_0, \\ \left. \begin{aligned} r_0 + r_1 = \varrho_0 + \varrho_1 - x(\alpha_1 + \alpha_0) - y(\beta_1 + \beta_0) + \frac{x^2 + y^2}{2} \left(\frac{1}{\varrho_1} + \frac{1}{\varrho_0} \right) \\ - \frac{(\lambda \alpha_1 + y \beta_1)^2}{2\varrho_1} - \frac{(\lambda \alpha_0 + y \beta_0)^2}{2\varrho_0} \end{aligned} \right\} \quad (59) \end{aligned}$$

Somit wird

$$u_p = A' \int \sin \left\{ \frac{2\pi t}{T} - f(x, y) \right\} dO \quad (59a)$$

Die Funktion $f(x, y)$ kann ohne wesentlichen Fehler allgemein mit der zweiten Potenz von x und y abgebrochen werden, reduziert sich aber im Falle

¹ A. SOMMERFELD, *Z. f. Math u Phys* 46, S. 11 (1901)

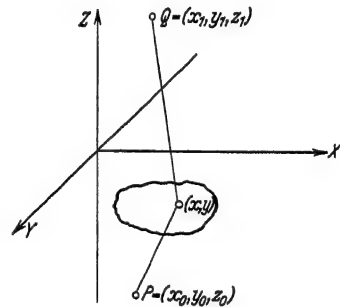


Abb 40 Lage von leuchtendem Punkt, Aufpunkt und beugender Öffnung

eines im Unendlichen liegenden Lichtpunktes und der Betrachtung in der Brennebene eines hinter der beugenden Öffnung befindlichen Objektivs auf die linearen Glieder Beugungserscheinungen der ersten Art werden als FRESNELSche, solche der zweiten Art als FRAUNHOFERSche bezeichnet. Für beide kann zusammenfassend geschrieben werden, wenn

$$\int \cos f(x, y) dO = C,$$

$$\int \sin f(x, y) dO = S$$

eingeführt wird,

$$J = A'^2 (C^2 + S^2), \quad (60)$$

wobei J die Intensität im Punkte P bedeutet

Dem Grad der Funktion $f(x, y)$ entsprechend unterscheidet sich die mathematische Behandlung beider Arten von Beugungserscheinungen. Ist $f(x, y)$ linear, was bei unendlicher Entfernung der Punkte P und Q von der beugenden Öffnung gemäß (59) eintritt, so ergibt sich bei einer beugenden Öffnung in Form eines Rechtecks mit den Seiten a und b parallel zu X und Y , wenn der Nullpunkt in die Mitte des Rechtecks verlegt wird,

$$C = \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{+\frac{a}{2}} \cos(\mu x + \nu y) dx dy, \quad S = \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{+\frac{a}{2}} \sin(\mu x + \nu y) dx dy \quad (61)$$

Die Integrale sind unmittelbar auszuführen und ergeben

$$C = \frac{4}{\mu \nu} \sin \frac{\mu a}{2} \sin \frac{\nu b}{2}, \quad S = 0$$

und damit für die Intensität

$$J = A'^2 \left(\sin \frac{\mu a}{2} \right)^2 \left(\sin \frac{\nu b}{2} \right)^2 \quad (62)$$

Das Beugungsbild ist von dunklen Streifen (vollständigen Minima) durchzogen, deren Lage durch die Bedingungen

$$\mu a = 2h\pi, \quad \nu b = 2h'\pi$$

bestimmt wird. Ihr Abstand ist um so kleiner, je größer a und b sind, die Intensität nimmt von der Mitte nach außen schnell ab, da

$$J_\mu = A'^2 a^2 b^2 \frac{1}{\pi^4 (2h+1)^2 (2h'+1)^2} \quad (63)$$

Der Übergang zu einem Spalt ist unmittelbar gegeben, ebenso zu einem schiefwinkligen Parallelogramm als beugender Öffnung.

Es sei noch darauf hingewiesen, daß für die Ermittlung der Maxima die transzendente Gleichung

$$\frac{\mu a}{2} = \operatorname{tg} \frac{\mu a}{2} \quad (64)$$

gilt, deren Wurzeln sich dem allgemeinen Wert

$$\frac{2\sigma+1}{2} \pi \quad (\sigma = 1, 2, 3 \dots)$$

immer mehr nähern, während für die ersten Wurzeln folgt

$$\frac{\mu a}{2} = 0, \quad \frac{\mu a}{2} = \frac{3\pi}{2} - 0,07\pi, \quad \frac{\mu a}{2} = \frac{5\pi}{2} - 0,042\pi$$

Die Auswertung des allgemeinen Integrals für den Fall einer einfachen kreisförmigen Öffnung läßt sich am besten erzielen, wenn man zu Polarkoordinaten übergeht und setzt

$$x = \varrho \cos \psi, \quad y = \varrho \sin \psi$$

S verschwindet, während C die Form annimmt

$$C = \int_0^R \int_0^{2\pi} \varrho \, d\varrho \, d\psi \cos\{\mu \varrho \cos \psi + \nu \varrho \sin \psi\}$$

Das Integral läßt sich leicht berechnen, ist

$$\mu = p \cos \vartheta, \quad \nu = p \sin \vartheta, \quad p \varrho = w,$$

so folgt zunächst bei Einführung der Zylinderfunktion von der Ordnung Null

$$C = \frac{4\pi}{p^2} \int_0^{pR} w J_0(w) \, dw$$

und schließlich

$$C = \frac{2\pi R}{p} J_1(pR), \quad (65)$$

woraus für die Intensität folgt

$$J = 4J_0 \left[\frac{J_1\left(\frac{2\pi R}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\frac{2\pi R}{\lambda} \sin \varphi} \right]^2, \quad \text{wobei} \quad \frac{2\pi}{\lambda} \sin \varphi = \sqrt{\mu^2 + \nu^2} \quad (66)$$

Die Nullstellen, die aus den Wurzeln der Gleichung $J_1(z) = 0$ folgen, sind¹

$$z_1 = 1,220\pi, \quad z_2 = 2,233\pi, \quad z_3 = 3,238\pi, \quad z_4 = 4,241\pi, \quad z_5 = 5,243\pi$$

Die im Beugungsbilde auftretenden kreisförmigen Maxima klingen in ihrer Intensität nach außen schnell ab. LOMMEL gibt der Reihe nach folgende Werte

$$\frac{I}{I_0} \quad 0,01745, \quad 0,00415, \quad 0,00165, \quad 0,00078$$

Punktartige Lichtquellen erscheinen daher dem Auge wegen der endlichen Größe der menschlichen Pupille als kleine kreisförmige Scheiben, solche von endlichem Durchmesser stets größer, als sie wirklich sind. Bestimmend für die scheinbare Vergrößerung ist auch die Intensität, da bei geringer Helligkeit die äußeren Teile des Beugungsbildes wegen ihrer Lichtschwäche nicht mehr wahrgenommen werden. Bei Anwendung eines Fernrohrs ist der Durchmesser des Beugungsscheibchens durch die Austrittspupille und somit durch den Objektdurchmesser gegeben². Auch für die Ermittlung des Auflösungsvermögens der Fernrohre sowie der Mikroskope ist die angedeutete Behandlung der Beugungserscheinungen durch eine kreisförmige Öffnung wichtig.

Die Ermittlung der Werte von C und S für den Fall, daß Lichtpunkt und Aufpunkt im Endlichen liegen, erfordert eine besondere Wahl des Koordinatensystems. Man verlegt Q in die X, Z -Ebene, wählt als Nullpunkt den Schnittpunkt von QP mit der X, Y -Ebene und dreht, bis die neue Z' -Achse parallel zu QP ist. Dann liegt die Öffnung freilich nicht mehr in der X, Y -Ebene, und es ist zu beachten, daß für jeden Aufpunkt P das Koordinatensystem geändert werden muß.

¹ H. v. LOMMEL, Abh. Bayer. Akad. d. Wiss. 15, S. 531 (1886).

² Siehe A. KÖNIG, Kapitel Fernrohr, L. ABBE, Die Lehre von der Bildentstehung im Mikroskop, Bearbeitet von O. LUMMER und L. REICHEL, Braunschweig 1900, J. PUCHT, Optische Abbildung, Einführung in die Wellen- und Beugungstheorie optischer Systeme, Braunschweig 1931.

Als Vorteil ist aber zu buchen, daß bei dieser Wahl die Funktion $f(x, y)$ eine rein quadratische wird, nämlich

$$f(x', y') = \frac{2\pi}{2\lambda} \left(\frac{1}{\varrho_0} + \frac{1}{\varrho_1} \right) (x^2 \cos^2 \varphi + y^2), \quad \alpha_1 = \sin \varphi$$

FRESNEL hat als erster einen Weg zur Berechnung dieser Integrale angegeben. Die Substitution

$$v^2 = \frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{\varrho_0} + \frac{1}{\varrho_1} \right) x^2 \cos^2 \varphi, \quad w^2 = \frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{\varrho_0} + \frac{1}{\varrho_1} \right) y^2$$

führt auf

$$C = \frac{k'}{\cos i} \int \cos \frac{\pi}{2} (v^2 + w^2) dv dw, \quad S = \frac{k'}{\cos i} \int \sin \frac{\pi}{2} (v^2 + w^2) dv dw, \quad (67)$$

so daß sich die Größen C und S unter der Voraussetzung, daß die Grenzen der Integrationsgebiete geradlinig und parallel zu den neuen Achsen sind, als Produkte der einfacheren Integrale

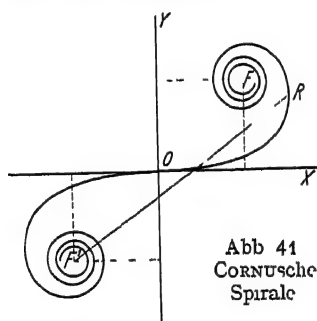
$$\xi = \int_0^u \cos \frac{\pi}{2} u^2 du, \quad \eta = \int_0^u \sin \frac{\pi}{2} u^2 du \quad (68)$$

darstellen lassen

Die verschiedenen Möglichkeiten der Auswertung, die von FRESNEL, LOMMEL, CAUCHY u. a.¹ erörtert worden sind, beruhen auf Reihenentwicklung und Anwendung von Rekursionsformeln und führen zu dem von GIBBRI² zahlenmäßig festgelegten oszillatorischen Verhalten der Integrale

Anschaulicher ist die Behandlung von CORNU³, der die ebene Kurve $F(\xi, \eta)$ angibt, deren Bogenlänge unmittelbar gleich dem Argument u ist

Die Kurve, deren Tangenten mit der ξ -Achse den Neigungswinkel $\frac{\pi}{2} u^2$ haben und deren Krümmungsradius $1/\pi u$ ist, ist eine Spirale, die sich asymptotisch den Punkten $(+\frac{1}{2}, +\frac{1}{2})$ und $(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})$ nähert (s. Abb. 41)



Bemerkenswert ist, daß wegen der allgemeinen Gültigkeit der FRESNEL'schen Zonenkonstruktion die Integration der Ausdrücke (68) auch über größere Argumente, ja selbst bis ins Unendliche ausgedehnt werden kann, weil die entfernten Zonen keine merklichen Beiträge zur Intensität liefern

Daher ist es auch möglich, die durch eine unendlich ausgedehnte Halbebene erzeugte Beugungserscheinung mit Hilfe der CORNU'schen Spirale abzuleiten, läßt man einen Punkt R von F' aus auf der Spirale wandern, so gibt das Quadrat

der Länge RF' die zu dem Parameter u und der durch ihn bestimmten Lage des Aufpunktes P gehörende Intensität I , die von $-\infty$ ausgehend bis zur Schattengrenze kontinuierlich anwächst und dann Maxima und Minima aufweist, deren Werte mit abnehmender Entfernung von der Schattengrenze sich immer weniger unterscheiden, an der Schattengrenze selbst ist die Intensität $1/4$ derjenigen, die bei Abwesenheit des Schirmes vorhanden sein würde

19 Wirkung mehrerer beugender Öffnungen Sind zwei gleiche rechteckige Öffnungen mit den Seiten a und b gegeben, die parallel zueinander angeordnet sind und deren zugekehrte Seiten a im Abstand d voneinander liegen, so können

¹ A. FRESNEL, Œuvres compl. S. 317, E. v. LOMMEL, l. c., A. CAUCHY, C. R. 15, S. 578 (1842), K. W. KNOCHENHAUER, Pogg. Ann. 41, S. 103 (1837), 43, S. 286 (1838)

² Mém. l'Acad. de Brux. 31, S. 1 (1863). ³ A. CORNU, J. de Phys. 3, S. 1 u. 44 (1874)

die Anteile beider Öffnungen zunächst getrennt berechnet werden, und man erhält dann entsprechend (62)

$$\frac{J}{J_0} = \cos^2 \frac{\mu(b+d)}{2} \left[\frac{\sin \frac{\mu a}{2}}{\frac{\mu a}{2}} \right]^2 \left[\frac{\sin \frac{\nu b}{2}}{\frac{\nu b}{2}} \right]^2 \quad (69)$$

Die durch eine Öffnung gegebene Intensitätsverteilung wird also durch den neuen Faktor in der Weise modifiziert, daß neue Minima hinzutreten, deren Ort durch die Beziehung

$$\mu(b+d) = (2h+1)\pi$$

bestimmt ist

Die Lage der Maxima in Richtung der ξ -Achse ist gegenüber derjenigen bei einfachem Spalt verändert. Sie ergibt sich aus einer ziemlich komplizierten transzendenten Gleichung, die aus

$$\frac{d}{d\mu} \left(\cos \frac{\mu(b+d)}{2} \frac{\sin \frac{\mu a}{2}}{\mu a} \right) = 0$$

folgt¹

Zu dieser Gruppe von Beugungserscheinungen gehören auch diejenigen, die man erhält, wenn man eine der beugenden Öffnungen mit einer verzögernden planparallelen Platte (Glimmer- oder Glasplatte) bedeckt. Die durch die Wirkung beider Platten bedingten Streifen treten aber nicht in allen Fällen auf. Betrachtet man ein Spektrum und bedeckt die Hälfte der Pupille mit einem Plättchen der bezeichneten Art, so daß die beugende Öffnung in zwei verschieden wirkende aufgelöst wird, dann sind die als TALBOTSche Streifen² bezeichneten Beugungsinterferenzen nur zu beobachten, wenn die bedeckende Platte sich auf der Seite der Pupille befindet, auf der man das kurzwellige Ende des Spektrums sieht. Auch bei Benutzung eines Spektralapparates, also Einschaltung von Fernrohren, tritt die Erscheinung auf, sobald die vor eine Fernrohröffnung geschobene Platte von der brechenden Kante der dispergierenden Prismen her eingeschoben wird.

Alle Erklärungsversuche allein auf Grund der einfachen Theorie der Interferenz sind gescheitert, und nur bei Heranziehung der Beugungseinflüsse ist eine Ableitung der Gesetzmäßigkeiten einwandfrei möglich. Zunächst folgt unmittelbar aus (69), daß für den angegebenen Fall das Argument des Faktors $\cos^2 \frac{\mu(b+d)}{2}$ um den Betrag der Phasenverzögerung $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n-1)D$ vermindert wird. Wenn das Licht nur von einer Linie herührt, ist der dritte Faktor gleich der Einheit, selbst dann, wenn die Wellen nicht streng senkrecht auf die Platte auffallen, sondern mit dem Einfallslot der Platte einen kleinen Winkel ϑ bilden, weil bei hinreichend kleinem Wert ϑ die Phasendifferenz

$$\frac{2\pi D}{\lambda} (n \cos \vartheta - \cos \vartheta')$$

sich von der für senkrechten Einfall geltenden nur um sehr wenig unterscheidet.

Dient als Lichtquelle nicht eine Lichtlinie, sondern ein Spektrum, so ist dem Ausdruck für die Intensität noch ein Faktor $f(\alpha_1)$ zuzufügen, der die Änderung der Amplitude mit Wellenlänge und Einfallsrichtung kennzeichnet. λ ebenso

¹ Auf die Anwendung zur Bestimmung von Sterndurchmessern und Sternabständen ist schon in Ziff 14 hingewiesen.

² H. F. TALBOT, Phil Mag (3) 10, S. 364 (1837), J. WALKER, ebenda 11, S. 531 (1906), R. W. WOOD, ebenda 18, S. 758 (1909), D. BREWSTER, Brit Ass Rep 2, S. 12 (1837).

wie die Phasenverzögerung φ sind also Funktionen von α_1 . Nach dem TAYLORschen Satz ist

$$\varphi = (\varphi)_0 - (\alpha_0 + \alpha_1) \left(\frac{d\varphi}{d\alpha_1} \right) = (\varphi)_2 - (\alpha_0 + \alpha_1) \frac{2\pi}{\lambda} D \frac{d}{d\alpha_1} \left(\frac{n-1}{\lambda} \right)$$

und damit die Intensität

$$J = F \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{\sin \omega}{\omega} \right]^2 \cos^2 \left(\omega \kappa - \frac{\varphi}{2} \right) d\omega, \quad \kappa = \frac{f}{a} + \frac{\lambda}{a} D \frac{d}{d\alpha_1} \left(\frac{n-1}{\lambda} \right), \quad (70)$$

woraus endlich

$$J = \frac{\pi}{2} F \left[1 + \frac{1}{2} \cos \varphi (|\kappa + 1| + |\kappa - 1| - 2|\kappa|) \right] \quad (71)$$

Wie leicht ersichtlich, ergeben sich für J nur dann Schwankungen, wenn der Faktor von $\cos \varphi$ einen endlichen Wert hat. Er ist aber Null, wenn $|\kappa| > 1$, und 1 $-\kappa$, wenn $|\kappa| < 1$. Daher ist für das Auftreten von Streifen im Spektrum Bedingung, daß $|\kappa| < 1$ sei. Nun ist aber der Wert κ bestimmt durch das Verhältnis des Abstandes f der Rechtecksmitten zur Rechtecksbreite a , der im Grenzfalle der Verschmelzung = 1 werden kann. Die vorher aufgeführte Bedingung kann nur erfüllt werden, wenn der Differentialquotient $\frac{d}{d\alpha_1} \left(\frac{n-1}{\lambda} \right)$ negativ ist, wenn also kürzere Wellen bei größeren X -Werten liegen, d. h. die Platte die Öffnung verdeckt, die näher dem violetten Ende des Spektrums sich befindet.¹ Die Streifen, deren Abstand durch die Dimensionen der Öffnungen bestimmt sind, können zur Orientierung im Spektrum benutzt werden.

Wie BABINET nachgewiesen hat, besteht eine einfache Beziehung zwischen den Beugungserscheinungen, die durch eine Reihe von Öffnungen $O_1 - O_n$ in einem undurchlässigen Schirm erzeugt werden, und solchen, die durch undurchlässige Schirme $O'_1 - O'_n$ von gleicher Größe und gleicher Anordnung hervorgerufen werden.

Ist u_1 die Erregung im Falle des Vorhandenseins der Öffnungen, u_2 diejenige bei durchlässigem Schirm mit aufgesetzten undurchlässigen Blenden und endlich u diejenige, die sich bei ungestörter Ausbreitung ergeben würde, so muß

$$u = u_1 + u_2$$

sein, u hat aber nur einen endlichen Wert für diejenigen Richtungen, die der Strahlrichtung zugeordnet sind, und es muß daher für alle anderen Richtungen

$$u_1 = -u_2$$

sein, woraus für die Intensität folgt, daß komplementäre Beugungsschirme sich in bezug auf FRAUNHOFERSche Beugungserscheinungen gleich verhalten, nur in der Zentralrichtung ergeben sich Unterschiede.²

Steigt die Anzahl der Öffnungen, so sind zwei Fälle zu unterscheiden

1 sämtliche Öffnungen sind gleich groß und ähnlich gelegen und lassen sich durch einfache Translation zur Deckung bringen,

2 die Beugung erfolgt an zahlreichen, unregelmäßig verteilten kleinen Körpern oder Öffnungen

Der erste Fall führt zur Theorie der Beugungsgitter, die durch eine große Anzahl regelmäßig verteilter starker durchlässiger oder starker reflektierender Flächenelemente bestehen

¹ Für den Fall einer kreisförmigen Öffnung, die zur Hälfte bedeckt ist, behandelt H. STRUVE [Mém. Acad. Sc. Pétersb. 31, S. 1 (1883)] die Aufgabe und erhält das gleiche Ergebnis.

² A. BABINET, C. R. 4, S. 638 (1837).

Die im allgemeinen Ausdruck vorhandenen Großen C und S (Ziff 18) ergeben sich dann bei Beschränkung auf FRAUNHOFERSche Beugungserscheinungen als Summen über die für die einzelnen Öffnungen gültigen, deren Mittelpunktskoordinaten (a_n, b_n) mit $(a_0, b_0) = (0, 0)$ sein mögen. Setzt man abkürzend

$$\sigma = \sum_{k=1}^n \sin(\mu a_k + \nu b_k), \quad \gamma = \sum_{k=1}^n \cos(\mu a_k + \nu b_k),$$

so wird

$$\left. \begin{aligned} C &= \gamma \int \cos(\mu x + \nu y) dO - \sigma \int \sin(\mu x + \nu y) dO, \\ S &= \sigma \int \cos(\mu x + \nu y) dO + \gamma \int \sin(\mu x + \nu y) dO \end{aligned} \right\} \quad (72)$$

und daher die Intensität

$$J = J_1 (\gamma^2 + \sigma^2) = \frac{J_0}{n^2} (\gamma^2 + \sigma^2) \left[\frac{\sin \frac{\mu a}{2}}{\frac{\mu a}{2}} \right]^2 \left[\frac{\sin \frac{\mu b}{2}}{\frac{\mu b}{2}} \right]^2 \quad (73)$$

Bei der gesamten Wirkung überlagern sich also der Beugungswirkung der einzelnen Öffnung noch Minima, die durch die Nullstellen des Faktors $\gamma^2 + \sigma^2$ gegeben sind. Besonders wichtig ist der Fall, in dem die Abstände gleich sind, die Mittelpunktskoordinaten also durch $a_{k+1} = k\bar{a}$ darstellbar sind, während $b_k = 0$ ist. Es wird

$$J = J_1 \left[\frac{\sin \frac{n\mu \bar{a}}{2}}{\sin \frac{\mu \bar{a}}{2}} \right]^2, \quad (74)$$

wo $n^2 J_1$ diejenige Intensität bedeutet, die herrschen würde, wenn nur eine einzige beugende Öffnung vorhanden wäre.

Der Übergang zu den eigentlichen Gittern erfolgt in derselben Weise wie vorher erwähnt, indem man die einzelnen Öffnungen in einer Richtung als unbegrenzt ansieht. Durch das Auftreten der neuen Minima werden die Hauptmaxima verschärft, doch ist zu beachten, daß bei reellen Gittern, die durch Einreißen feiner Linien auf ebenen oder gekrümmten Glas- oder Metallflächen hergestellt werden, die Form der Furchen und auch die Natur des beugenden Materials noch von Einfluß sind¹.

Besonders ausgeprägt ist dieser Einfluß hinsichtlich der Polarisation des durch Gitter gebeugten Lichtes. Ist die Gitterkonstante klein gegen die Wellenlänge, so tritt nur das Spektrum nullter Ordnung auf, in dem wesentlich nur die senkrecht zu den Gitterstäben schwingende Komponente der elektrischen Schwingung durchgelassen wird (HFRIZ-Effekt). Den anderen Grenzfall findet man bei einer gegen die Wellenlänge großen Gitterkonstante. Es ergibt sich bei dielektrischen Stäben im Spektrum nullter Ordnung ein Überwiegen des senkrecht zu den Stäben polarisierten Lichtes (Du Bois-Effekt), während bei leitenden Drähten der HFRIZ-Effekt überwiegt².

Auch den Einfluß der Furchenform hat Lord RAYLEIGH diskutiert³. In Anlehnung an die elementare Theorie wird die Intensität in den Spektren verschiedener Ordnung berechnet. Beleuchtet man das Gitter durch eine ebene Welle

$$e^{-i k(x\alpha_0 + y\beta_0 + z\gamma_0)},$$

¹ L. C. GLASPER, *J. techn. Phys.* 7, S. 31 u. 252 (1926), s. auch E. BUCHWALD, *Phys. Z.* 26, S. 672 (1925), 27, S. 353 (1926), *Ann. d. Phys.* (4) 80, S. 279 (1926), C. KOLLER, *Inaug.-Diss.* Berlin 1931.

² Cf. SCHAFFER u. J. REICHE, *Ann. d. Phys.* 35, S. 817 (1911), W. v. IGNATOWSKI, ebenda 44, S. 369 (1914), H. DU BOIS u. H. RUBENS, ebenda 35, S. 243 (1911).

³ *Sci. Pap.* 5, S. 388, *Proc. Roy. Soc. A* 79, S. 399 (1907).

so sendet ein Element dy des Gitters, das als linienförmig anzusehen ist, eine gebeugte Welle aus, die in größerer Entfernung r dargestellt werden kann durch

$$\frac{1}{r} \psi(\alpha, \beta) e^{-ik(r + x\alpha + y\beta)}$$

Die Richtungsfunktion ψ ist abhängig von der Lage und den physikalischen Eigenschaften der Gitterstriche, und es wird bei Zerlegung nach dem FOURIERschen Satz

$$\psi = \sum_1^{\infty} j(c_j \cos j\phi x + s_j \sin j\phi x) = S\zeta, e^{j\phi x} \quad (75)$$

Ist die einfallende Welle unabhängig von y , und trifft sie unter dem Winkel Θ_0 zur Normalen auf, so ergibt sich für die reflektierte Welle

$$u_r = e^{ikx \sin \Theta_0} \sum_{-\infty}^{+\infty} A_h e^{ih\phi x} e^{-ikz \cos \Theta_h} \quad (76)$$

Hierin ist

$$\sin \Theta_h - \sin \Theta_0 = \frac{h\phi}{k}$$

Entsprechend folgt für die gebrochene Welle, wenn der Brechungsindex des zweiten Mediums $n = \frac{k'}{k}$ ist,

$$u_b = e^{ikx \sin \varphi_0} \sum_{-\infty}^{+\infty} B_h e^{ih\phi x} e^{ik'z \cos \varphi_h}, \quad (76a)$$

wobei φ_0 die Richtung der gebrochenen Welle angibt. Dabei ist

$$\frac{\sin \varphi_0}{\sin \Theta_0} = \frac{1}{n}, \quad \sin \varphi_h - \sin \varphi_0 = \frac{h\phi}{k'}$$

Aus den Grenzbedingungen (Stetigkeit der tangentiellen Komponenten) ergeben sich die Koeffizienten A_h und B_h , wobei im allgemeinen vorausgesetzt werden muß, daß die Tiefen der Gitterstriche klein gegen die Wellenlänge sind. Das in (75) vorherrschende Glied bewirkt auch im Beugungsbild eine Verstärkung der Intensität im Spektrum der betreffenden Ordnung. Die Resultate der Rechnung sind in bezug auf den Polarisationszustand der reflektierten Spektren bei durchsichtigen Glasgittern in guter Übereinstimmung mit den FRAUNHOFERschen Beobachtungen¹. Gleiches gilt für den von VOIGT behandelten Fall endlicher Leitfähigkeit².

Sind beugende Öffnungen oder Schirme von unregelmäßiger Verteilung und Größe gegeben, so ist eine Angabe der Intensitätsverteilung nur dann möglich, wenn die Zahl der beugenden Elemente sehr groß ist. Der maßgebende Faktor $(\gamma^2 + \sigma^2)$ [s. Gleichung (73)] läßt sich in Form einer FOURIERschen Reihe darstellen, deren Glieder dem absoluten Betrage nach stets kleiner als 1 sind. Bei zunehmender Zahl der Öffnungen wird das konstante Glied, das gleich der Zahl der Öffnungen ist, immer größer, der Wert der FOURIER-Reihe immer kleiner, bis schließlich die Intensitätsverteilung nur durch die Beugungswirkung einer Öffnung bestimmt wird, jedoch folgt für die Intensität der Maxima der n -fache Wert dessen, der für die Einzelöffnung eintreten würde, die Größe der beugenden Öffnungen darf nur innerhalb gewisser Grenzen, die durch die Zahl der Öffnungen und die Größe der gesamten, die beugenden Öffnungen enthaltenden Fläche gegeben ist, schwanken.

¹ J. FRAUNHOFER, Ann d. Phys. 74, S. 364 (1823), Ges. Abh. München 1888, S. 134.

² W. VOIGT, Gott. Nachr. 1911, S. 41, 1912, S. 385, B. POGANY, Ann d. Phys. 37, S. 257 (1912), J. FROHLICH, Polarisation des gebeugten Lichtes, Leipzig 1907, P. ZEEMAN, Researches in Magneto-Optics, Kap. IV, London 1913.

20 Beugungserscheinungen bei Abbildung durch Kugelwellen Die KIRCHHOFFsche Formel (55) ist als Ausgangsgleichung für die Behandlung der Beugungserscheinungen zu benutzen, die in der Brennebene (oder der Bildebene) abbildender Systeme auftritt. Für aberrationsfreie Bündel, deren Querschnitt kreisförmig ist, also solche, deren geometrische Vereinigungspunkte in der Nähe der Achse des als zentriert angenommenen Systems liegen, ergibt sich dann für die Intensität

$$I_p = \frac{\pi^2 a^4}{f^4} \left(\frac{2 J_1(\eta)}{\eta} \right)^2, \quad (77)$$

wobei $J_1(\eta)$ die BESSELsche Funktion erster Art und erster Ordnung, a der Radius der Objektöffnung, f die Brennweite und

$$\eta = \frac{2\pi}{f} \varrho_p \frac{a}{f} = 2\pi \frac{a}{f} \sin \alpha$$

eine dimensionslose Größe ist, die als optische Einheit bezeichnet wird. Die Nullstellen und die Größen der Maxima sind bereits in Ziff 18 angegeben, doch gibt (77) noch die weitere Folgerung, daß die Intensität proportional der vierten Potenz der Objektöffnung, umgekehrt proportional der vierten Potenz der Brennweite und umgekehrt proportional dem Quadrat der Wellenlänge ist.

Für die Beugungserscheinung bei ausgedehnten Objekten ist über die von den einzelnen Flächenelementen in einem bestimmten Punkt erzeugten Intensitäten zu summieren¹, ebenso ist die Abhängigkeit der Intensität von der Wellenlänge zu beachten, die noch dadurch beeinflußt wird, daß das Aufnahmeinstrument (Platte, Auge) Empfindlichkeitswerte hat, die selbst stark von der Wellenlänge abhängig sind. Die sich ergebende Helligkeitsverteilung ist maßgebend für die scheinbare Bildbegrenzung, die nur dann eindeutig bestimmt sein wurde, wenn die objektive Lichtverteilung Unstetigkeitsstellen besitzen würde. Nach MACIE² und STELLIGER³ sind für die vom Auge empfundenen Bildgrenzen die Größen des ersten und zweiten Differentialquotienten der Lichtverteilungsfunktion maßgebend, und zwar ergibt sich die Möglichkeit des Auftretens von Bildgrenzen, wenn entweder $\Delta J(x, y) = \frac{\partial^2 J(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 J(x, y)}{\partial y^2}$ Null wird oder eine Unstetigkeit aufweist oder wenn der Differentialquotient dieses Ausdrucks die genannten Eigenschaften hat⁴.

Die Folgerungen aus dieser Theorie decken sich gut mit den Beobachtungen bei Doppelsternen mit gleicher oder verschiedener Größe der Komponenten, es ist auch versucht worden, auf diesem Wege die Verdopplung der Marskanäle zu erklären.

Bei Behandlung der Frage, wie die Intensitätsverteilung außerhalb der Brennebene (Bildebene) sich darstellt, führt die Diskussion der KIRCHHOFFschen Gleichung auf Ausdrücke, die denjenigen der FRESNELschen Beugungserscheinungen entsprechen. Die Intensitätsverteilung ist ebenfalls durch BESSELsche Funktionen darstellbar, doch ist die allgemeine Erörterung nur schwer durchführbar. Ein anschauliches Bild der Intensitätsverteilung in der Nähe des Brennpunktes einer Kugelwelle hat BIRCK⁵ gegeben, indem er die Kurven gleicher Helligkeit ermittelt hat und die Gebiete gleicher Intensität durch Schraffierung kennzeichnet (Abb 42).

¹ () BIRCK, Das photographische Helligkeitsverhältnis der Sonne zu den Fixsternen (Göttingen 1909)

² Analyse der Empfindungen, 3 Aufl., S 163ff. Jena 1902

³ Abh d Akad d Wiss II Kl., 19 Bd. München 1896

⁴ A. KÜHL, Zf ophthalm Opt VIII, S 129 (1920), s auch A. KÜHL, Inaug-Diss München 1909

⁵ Zf Phys 40, S 421 (1926)

Für größere Abstände zwischen Brennpunkt und Aufpunkt gelten die von SCHWARZSCHILD¹ entwickelten Formeln, nach denen sich die Intensität langs eines Radius des kreisförmigen Beugungsbildes durch Überlagerung zweier nahezu sinusförmiger Wellen über die Intensität ergeben wurde, die bei geradliniger Fortpflanzung auftreten würde. Eine strengere Untersuchung ist von DEBYE² durchgeführt worden. Wesentlich ist dabei die Tatsache, daß in der Nähe des Brennpunktes Phasenänderungen eintreten, die bereits vor dem Brennpunkt oszillatorisch beginnen, im Brennpunkt selbst gegen den geometrisch-optischen Wert den Betrag $\pi/2$ annehmen und hinter dem Brennpunkt nach weiterem Pendeln den Wert π erreichen.

Im allgemeinsten Falle kann fast jede Fläche Wellenfläche eines möglichen Schwingungsvorganges sein. Die bei realen Systemen auftretenden Wellenflächen, die durch ihre Abweichung von der Kugelform die Abbildungsfehler

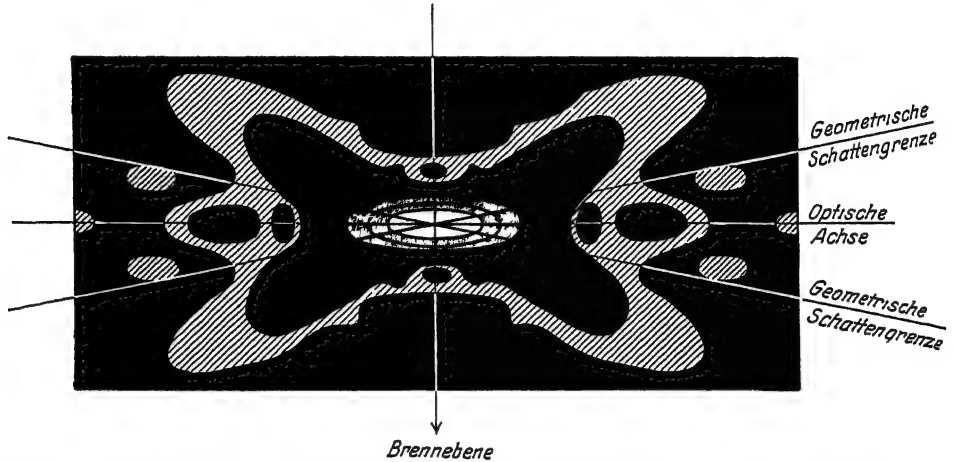


Abb 42 Lichtverteilung in der Nähe des Fokus. Wenn man die Helligkeit in der Mitte gleich 100 setzt, so bedeuten die einzelnen Schraffierungen ganz dunkel 1, dann zunehmend 2½, 5, 10, 25, 50, 75, 100. Die Abbildung ist im Sinne der geometrischen Optik aberrationslos vorausgesetzt. (Aus F. JENTZSCH, Beugungstheorie der optischen Instrumente, Handb. d. Physik Bd. 21. Herausgegeben von H. GEIGER und K. SCHIFFEL. Berlin: Julius Springer 1929.)

optischer Systeme kennzeichnen, sind ausführlich von PICHT³ diskutiert worden, wobei die für den Lichtvektor u_P sich ergebenden Integrale durch Reihenentwicklung gelöst worden sind.

Auch bei der beugungstheoretischen Behandlung des Regenbogens ergibt sich eine von der Kugelform abweichende Wellenfläche, die durch die Brechung an den Wassertropfen entsteht⁴. Die Beugungserscheinungen liegen in der Nähe derjenigen Strahlen, die von den Wendepunkten der Wellenfläche ausgehen, die Auswertung der Integrale wird möglich, wenn bestimmte Annahmen über die Form der Wellenfläche in der Nähe des Wendepunktes gemacht werden. Lage und Intensität der Maxima stimmt mit den Beobachtungen überein, auch der Einfluß der Größe der Regentropfen läßt sich erfassen⁵.

¹ Sitzber. K. Akad. Wiss. München 1898, S. 271.

² Ann. d. Phys. (4) 30, S. 755 (1909).

³ Ann. d. Phys. (4) 77, S. 685 u. 785 (1925).

⁴ E. MASCART, Traité d'Opt. 3, S. 437 u. 444, W. MOBIUS, Ann. d. Phys. (4) 33, S. 79 u. 1493 (1910).

⁵ J. PERNTNER, Wien Ber. (2a) 106, S. 135 (1897). Weitere Quellen: E. GEHRCKE, Handb. der physik. Optik I, S. 578ff. Leipzig 1927.

d) DOPPLER-Effekt

21 Ableitung der allgemeinen Beziehungen Die Behandlung der Optik bewegter Körper kann von verschiedenen Annahmen ausgehen. Entweder betrachtet man den Träger des elektrischen Feldes, den Äther, als ideal isotrop und ruhend und schreibt Bewegung nur der Masse und den mit ihr verknüpften elektrischen Ladungen zu oder nimmt überdies noch die Möglichkeit einer Veränderlichkeit des Äthers an, die sich in Anisotropie, Eigenbewegung oder Einwirkung der ponderablen Masse auf den Äther äußern kann, unmittelbar zusammenhängend hiermit sind die Fragen nach der Existenz des Äthers überhaupt.

Schon unter Zugrundelegung der klassischen Vorstellungen, die eine irgendwie gearbete Wellenbewegung voraussetzen, ebenso aber auch bei Einbeziehung der MAXWELLSchen Theorie gelingt es, die einfachsten Beziehungen abzuleiten, die zwischen der Ruhefrequenz und der bei Bewegung, sei es der Lichtquelle oder des Beobachters oder beider zugleich, vorhandenen bestehen. Wesentlich ist nur, daß die Geschwindigkeit v der Lichtquelle oder u des Beobachters klein ist gegenüber der Lichtgeschwindigkeit c , so daß man sich auf die ersten Potenzen von v/c bzw. u/c beschränken kann.

Ist L die Lichtquelle und sendet diese zur Zeit t eine Welle aus, so möge diese zur Zeit t' an dem Ort P des Beobachters eintreffen. Ist die Entfernung r , so ist

$$t' = t + \frac{r}{c}$$

Für eine zweite Welle, die zur Zeit $t + \Delta t$ von L ausgeht, gilt entsprechend

$$t' + \Delta t' = t + \Delta t + \frac{r - v \Delta t \cos \varphi}{c}$$

und damit

$$\frac{\Delta t'}{\Delta t} = 1 - \frac{v \cos \varphi}{c}$$

Hierbei ist angenommen, daß sich die Lichtquelle unter einem Winkel φ auf den Beobachter zu bewegt, die Bahn der Lichtquelle in der Zeit Δt also gleich $v \Delta t$ und die Komponente in der Beobachtungsrichtung $v \cos \varphi \Delta t$ ist. Bei konstanter Geschwindigkeitskomponente in der Beobachtungsrichtung läßt sich diese Beziehung auch auf endliche Zeiten ausdehnen. Nimmt man an, daß während des Zeitintervalls Δt eine Anzahl Wellen von der Lichtquelle ausgeht, so muß dieselbe Anzahl Wellen während der Zeit $\Delta t'$ in P eintreffen, und der dort befindliche Beobachter wird eine Änderung der Frequenz (und damit auch der Wellenlänge) feststellen. In gleicher Weise ist auch der Einfluß der Bewegung des Beobachters gegen die Lichtquelle zu berechnen, und man findet für ein kleines Zeitintervall bei großer Entfernung LP , wenn der Winkel zwischen Blickrichtung und Bewegungsrichtung des Beobachters ψ ist,

$$\frac{\Delta t'}{\Delta t} = \frac{1 \pm \frac{v \cos \varphi}{c}}{1 \pm \frac{u \cos \psi}{c}} = \Delta t \left(1 \pm \frac{v \cos \varphi}{c} \pm \frac{u \cos \psi}{c} \right) \quad (78)$$

oder bei Übergang auf die Wellenlänge

$$\frac{\lambda}{\lambda'} = 1 \pm \frac{v \cos \varphi}{c} \pm \frac{u \cos \psi}{c} \quad (78a)$$

Da die Bestimmung der Wellenlänge auf $0,01 \text{ \AA}$ ohne allzu große Schwierigkeiten durchführbar ist, ergibt sich somit aus Gleichung (78a) eine zugehörige

Annäherungsgeschwindigkeit von etwa 0,5 km/sec als ungefähre Grenze der erreichbaren Meßgenauigkeit, wobei aber zu beachten ist, daß v nicht nur von dem Wellenlangenintervall, sondern auch noch von der Größe der Wellenlänge abhängig ist. Diese zuerst von DOPPLER ausgesprochenen Gesetzmaßigkeiten, die besonders für die Astrophysik von Bedeutung sind, weil sie weitgehende Schlüsse auf die Bewegung der Himmelskörper zulassen, für die auf anderem Wege keine Unterlagen zu beschaffen sind, können als hinreichend experimentell und theoretisch bewiesen angesehen werden¹. Freilich bleiben noch einige Fragen offen, so diejenige nach dem Einfluß der Eigengeschwindigkeit der Lichtquelle auf die Lichtgeschwindigkeit, der zwar nach den Aberrationsbeobachtungen sowie nach den Versuchen MICHELSON-SAGNACS und Doppelsternbeobachtungen unwahrscheinlich ist, aber noch nicht gänzlich gelegt werden kann.

Die Aberration, die als Folge der absoluten Bewegung der Erde im Äther anzusehen ist², gibt eine scheinbare Winkeleränderung α des Sternortes, die sich als Funktion der Lichtgeschwindigkeit c , der Geschwindigkeit u des Beobachters und des Winkels $(c, u) = \omega$ darstellen läßt in der Form

$$\sin \alpha = \frac{\frac{u}{c} \sin \omega}{\sqrt{1 + \frac{2u}{c} \cos \omega + \frac{u^2}{c^2}}}$$

oder für kleine Werte von u

$$\sin \alpha = \frac{u}{c} \sin \omega$$

Der Betrag der Aberration ist nur abhängig von der Geschwindigkeit der Erde (des Beobachters), nicht aber von der der Lichtquelle, wie auch STARK an Kanalstrahlen nachgewiesen hat³.

MICHELSONS Versuch zur Bestimmung des Einflusses der Erdrotation ergab für den Gangunterschied rechnerisch $0,236 \pm 0,002$, experimentell $0,230 \pm 0,005 \mu$ und damit eine Bestätigung für die Behauptung, daß der Lichtäther an der Bewegung der Erde nicht teilnimmt und die Interpretation der Aberration zu Recht besteht⁴. Ein gleiches Ergebnis hatte der SAGNACSche Rotationsversuch, bei dem die gesamte Apparatur in schnelle Umdrehung versetzt wurde und die Interferenzstreifen, die beim Durchlaufen einer Interferenzanordnung im entgegengesetzten Sinne (also einmal mit, einmal gegen die Drehung) erzeugt wurden, photographisch aufgenommen wurden⁵.

In einem gewissen Widerspruch hierzu steht freilich der ältere MICHELSON-MORLEYSche Versuch, der die Frage klären sollte, ob eine Mitführung des Äthers bei der Translationsbewegung der Erde stattfindet oder nicht. Bei der einfachen MICHELSONschen Anordnung (Abb 27 sowie 28 c, f, g) sollte, falls der Äther in bezug auf das mit der Erde fortschreitende Interferenzsystem ruht, für die beiden verschiedenen Lichtwege ein Gangunterschied auftreten, der durch die Größe $2lv^2/c^2$ gegeben sein mußte, wobei l den Abstand des halbdurchsichtigen Spiegels G_1 von dem in Richtung der Erdbewegung liegenden Spiegel S_1 bezeichnet, v die Geschwindigkeit des Apparates gegen den als ruhend voraus-

¹ Grundlegende Arbeit C DOPPLER, Abh Bohm Ges d Wiss (2) 5, S 465 (1843). Geschichtliche Darstellung H KONEN, Das Dopplersche Prinzip in H KAYSER, Handb der Spektroskopie 2, Kap VII, S 369 Leipzig 1902. Obere Grenze der Geschwindigkeiten K LION, Z f Phys 83, S 442 (1933).

² J BRADLEY, Phil Trans 35, S 637 (1728), P LENARD, Äther und Uräther, 2 Aufl Leipzig 1922, P HARZER, A N 212, S 65 (1920), F HAYN, ebenda 224, S 287 (1925), R TOMASCHECK, Z f Phys 32, S 397 (1925).

³ J STARK, Ann d Phys (4) 77, S 16 (1925).

⁴ A A MICHELSON u H G GALE, Ap J 61, S 140 (1925).

⁵ G SAGNAC, J de Phys (5) 4, S 177 (1914), s auch A PEROT, C R 178, S 380 (1924).

gesetzten Äther und c die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Bei der Durchführung des Versuches¹ ergab sich ein negatives Resultat selbst dann, als die Länge des Lichtweges auf $5,5 \cdot 10^7$ Lichtwellenlängen vergrößert worden war. Neuere Arbeiten haben eine wesentliche Änderung der Ergebnisse nicht gebracht², jedenfalls sind die beobachteten Streifenverschiebungen stets erheblich kleiner gewesen als die theoretisch berechneten Werte. Sie waren sogar überlagert von einem Effekt, der mit der Jahreszeit, in der die Beobachtungen angestellt wurden, wechselte: er war im April größer als im November und Dezember. Der Ursprung dieser in gleicher Periode mit der Drehung des Apparates auftretenden Schwankungen ist völlig rätselhaft, doch können sie schon durch kleine Temperaturschwankungen erklärt werden³. Der schon bei früheren Versuchen beachtete Einfluß der Beobachtungshöhe (beobachtet wurde teils in der Ebene, teils auf dem Mt Wilson in etwa 1800 m Meereshöhe) ist ebenfalls nicht nachweisbar, denn die bei einem Ballonaufstieg durchgeführten Versuche von PICCARD und STAHL⁴ verliefen ebenfalls negativ. Die gemessenen Verschiebungen, die einer Geschwindigkeit des Ätherwindes 7 km/sec entsprechen wurden, liegen in der Größenordnung der Beobachtungsfehler.

Der Unsicherheit der Ergebnisse entsprechend erscheinen die theoretischen Deutungen, die teils unter Zuhilfenahme der Kontraktionshypothese⁵, teils durch die Annahme einer Anisotropie des Weltäthers oder einer ballistischen Emissionstheorie⁶ versucht worden sind, ebenfalls nicht genügend begründet.

Man wird also an den einfachen Annahmen der elementaren Theorie festhalten dürfen, zumal für kleine Geschwindigkeiten v sowohl die LORENTZsche Theorie als auch die elektromagnetische für den DOPPLER-Effekt dieselben Gleichungen liefert, nämlich

$$\text{bei bewegtem Beobachter} \quad \nu_1 = \nu \left(1 \pm \frac{v}{c}\right),$$

$$\text{bei bewegter Lichtquelle} \quad \nu_1 = \frac{\nu}{1 \pm \frac{v}{c}},$$

wo ν die Schwingungszahl der von der Lichtquelle ausgehenden Wellen, v die Geschwindigkeit in Richtung der Verbindungslinie Lichtquelle—Beobachter und ν_1 die beobachtete Schwingungszahl ist.

Für die bei Auftreten des DOPPLER-Effektes zu beobachtende Intensität ergeben sich verschiedene Ausdrücke je nach den Annahmen, die für die Änderung der Amplitude A und des in der Formel

$$J = k A^2 \nu^2$$

auftretenden Proportionalitätsfaktors k gemacht werden.

Allgemein kann gesetzt werden

$$J_1 = J \left(1 \pm \frac{3v}{c}\right) f\left(\frac{v}{c}\right) \left[F\left(\frac{v}{c}\right)\right]^2 \quad (79)$$

¹ A. MICHELSON, Amer J of Science 22, S 120 (1884), A. MICHELSON u. A. MORLEY, Phil Mag 24, S 449 (1887), A. MORLEY u. R. MILLER, ebenda 9, S 680 (1905).

² G. V. GIEICH, Z f Phys 59, S 132 (1929), A. MICHELSON, F. G. PEASE u. F. PEARSON, Nature 123, S 88 (1929), G. V. GIEICH, Z f Phys 61, S 291 (1930).

³ L. BRILINSKY, C R 179, S 559 (1924).

⁴ L. STAHL, Naturwiss 14, S 935 (1926), A. PICCARD u. E. STAHL, ebenda 15, S 140 (1927).

⁵ H. A. LORENTZ, Versuch einer Theorie der elektr. und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern, Leipzig 1906.

⁶ BIRKLAND, Phil Mag (6) 37, S 152 (1919), O. M. STUART, Phys Rev 32, S 418 (1912), s. auch E. GEHRCKE, Z f techn Phys 4, S 292 (1923).

Hieraus können als Sonderfälle die von KONEN, FIZEAU, EOTVOS u. a.¹ aufgestellten Beziehungen gewonnen werden, die sämtlich die Form haben

$$J_1 = J \left(1 \pm \frac{Nv}{c} \right) \quad N = 1, 2, 3,$$

22 Experimentelle Beweise Außer den akustischen Beweisen² liegt eine Reihe von Versuchen vor, die eine Anwendbarkeit des Prinzips auf optische Vorgänge erkennen lassen. BELOPOLSKI³ sowohl wie FURST GALIZIN und J. WILIP⁴ haben die Richtigkeit des einfachen Ansatzes bestätigen können, und auch die Breite der Spektrallinien, die wesentlich durch den DOPPLER-Effekt bedingt ist, führt zu der gleichen Folgerung.

Jeder endlich begrenzte Wellenzug ergibt eine gewisse Breite der Spektrallinien, die durch den DOPPLER-Effekt beträchtlich vergrößert wird. In jedem leuchtenden Gase bewegen sich die leuchtenden Atome mit einer der Temperatur entsprechenden Geschwindigkeit nach allen Richtungen, wodurch eine durch die DOPPLERSche Formel gegebene Veränderung der Wellenlänge der Linien eintritt, die von den einzelnen Atomen emittiert werden. Die Halbwertbreite ergibt sich in Abhängigkeit vom Molekulargewicht M des Gases, der absoluten Temperatur T und der universellen Gaskonstante R zu

$$\omega'_0 = 2 \frac{\sqrt{3 \ln 2}}{c} v_0 \sqrt{\frac{RT}{M}} \quad (80)$$

oder zahlenmäßig in ÅNGSTROM-Einheiten

$$\Delta \lambda = 7,162 \cdot 10^{-7} \lambda_0 \sqrt{\frac{T}{M}}$$

Für die Ableitung wird Gebrauch gemacht von dem MAXWELLSchen Ansatz für die Geschwindigkeitsverteilung, nach der die Anzahl dN der Atome innerhalb des Geschwindigkeitsgebietes v bis $v + dv$ gegeben ist durch

$$dN = a e^{-v^2/\beta} dv$$

Berücksichtigt man, daß die Intensität $J(v) = \alpha \frac{dN}{dv} = \alpha a e^{-v^2/\beta}$ für die Geschwindigkeit nach dem DOPPLERSchen Prinzip

$$v = \frac{d\lambda}{\lambda_0} c$$

ist, so folgen die obigen Ausdrücke für die Halbwertbreite unmittelbar. Wie ersichtlich, kann der Ausdruck sowohl zur Bestimmung der Temperatur als auch zur Ermittlung des Atomgewichtes benutzt werden.⁵

Die wichtigsten Beweise für die Richtigkeit des DOPPLERSchen Prinzips haben astrophysikalische Messungen geliefert. Wir brauchen hier nicht näher darauf einzugehen, sondern verweisen auf die verschiedenen Kapitel des vorliegenden Werkes, in denen diese Dinge ausführlich behandelt werden.

Der transversale DOPPLER-Effekt, der sich bei Einführung der LORENTZschen Transformationsgleichungen in der zweiten Form⁶ für die zur Geschwin-

¹ H. KAYSER, Handb. der Spektroskopie 2, Kap. VII, S. 369 (Leipzig 1902), FIZEAU, Pogg. Ann. 92, S. 652 (1854), R. v. EOTVOS, ebenda 152, S. 513 (1874), J. PERZVAL, Wien Ber. 8 II, S. 567 (1852), 9 II, S. 699 (1852), E. KETTELER, Astronomische Undulationstheorie, S. 149 (Bonn 1873).

² H. BUYS-BALLOT, Pogg. Ann. 66, S. 321 (1845), H. C. VOGEL, ebenda 158, S. 287 (1876), E. MACH, ebenda 112, S. 58 (1861), Wien Ber. 77 II, S. 299 (1878).

³ A. N. 137, S. 33 (1895). ⁴ Ap. J. 26, S. 45 (1907).

⁵ SCHONROCK, Ann. d. Phys. 20, S. 995 (1906), CH. FABRY, H. BUISSON, J. de Phys. 5 (2), S. 442 (1912).

⁶ H. A. LORENTZ, Proc. Acad. Sc. Amsterdam 6, S. 809 (1904).

digkeitsrichtung senkrechte Richtung ergibt, konnte durch STARK¹ eigentümlicherweise nicht ausgeschaltet werden, zeigte sich aber etwa 20 mal größer als der von der Theorie geforderte Wert. Nach der Relativitätstheorie mußte der transversale DOPPLER-Effekt für einen Winkel zwischen Beobachtungsrichtung und Geschwindigkeit der Lichtquelle verschwinden, der für $v = 100\,000 \text{ km/sec}$ $99^\circ 52,5'$, für $v = 282\,843 \text{ km/sec}$ 135° sein mußte².

e) ZEEMAN-Effekt und STARK-Effekt

23 ZEEMAN-Effekt Grundlagen Die in den Spektren der Elemente auftretenden Linienfolgen, die als Serien bezeichnet werden, zeigen äußeren Einwirkungen gegenüber verschiedenes Verhalten, und die Einzellinien können nach diesem in die verschiedenen Serien eingeordnet werden. Als wesentlichstes Merkmal dieser Zugehörigkeit und gleichzeitig als Schlüssel zum Verständnis der Gesetze der Spektrallinien und der atomtheoretischen Deutung ist das Verhalten der Linien im Magnetfeld und im elektrischen Felde zu beachten (ZEEMAN-Effekt und STARK-Effekt). Die Einwirkung magnetischer Felder auf elektromagnetische Wellen ist schon von FARADAY 1846 festgestellt worden, der die Wirkung beim Durchgang des Lichtes durch magnetisierte Körper untersuchte, später (1877) beobachtete KERR das Verhalten polarisierten Lichtes bei der Reflexion an magnetischen Spiegeln. FARADAYS Untersuchungen sind es gewesen, die ZEEMAN auf den Gedanken gebracht haben, die nunmehr mit Hilfe der elektromagnetischen Theorie erkläraren Vorgänge der magnetischen Beeinflussung der Emission unter Benutzung der inzwischen entwickelten interferentiellen Methoden zu durchforschen.

Bei genügender Auflösung und ausreichender Stärke der Felder konnten die von LORENZ theoretisch abgeleiteten Grunderscheinungen: Zerlegung einer Spektrallinie in ein Dublett bei Beobachtung in Richtung der Kraftlinien, Aufspaltung in ein Triplett bei Beobachtung senkrecht zu den Kraftlinien experimentell nachgewiesen werden, wenn auch anfangs nur in Form des anomalen Effektes beim Na, dem erst später der Nachweis des normalen Effektes (beim Cd und Zn) folgte³.

Die theoretischen Betrachtungen knüpfen teils an die klassische Elektronentheorie an, teils benutzen sie die Ergebnisse der Quantentheorie, für die einfachen beobachteten Zerlegungen genügt erstere, für die komplizierteren Zerlegungen sind besondere Vorstellungen über den Bau des Atoms erforderlich, wobei hervorzuheben sein mag, daß die quantitative Berechnung erst bei Anwendung der modernen Quantenmechanik durchgeführt werden kann, für die die Atommodelle nur mehr die Bedeutung von Gedächtnishilfen haben.

Die feldlose Bewegung eines Elektrons in einem räumlich festen Bezugssystem kann dargestellt werden durch die Gleichungen

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum A_n \cos(2\pi t\nu_n - \alpha_n), \\ y(t) &= \sum B_n \cos(2\pi t\nu_n - \beta_n), \\ z(t) &= \sum C_n \cos(2\pi t\nu_n - \gamma_n), \end{aligned}$$

¹ Ann d Phys (4) 21, S 450 (1906)

² V. VARIČAK, B d sudslaw Akad d Wiss Zagreb 11-12, S 100 (1919), s auch P A SCHUBERT, Z f Phys 15, S 121 (1923)

³ A. COTTON, Le Phénomène de Zeeman. Scientia Paris 1900, H. A. LORENTZ, Rapports pres au Congrès int Paris 1900, W. VOIGT, Magneto- und Elektrooptik Leipzig 1908, H. A. LORENTZ, In: vgl d math Wiss V, Heft 2 Leipzig 1909, P. ZEEMAN, Researches in Magneto-Optics London 1913, deutsch Leipzig 1914, A. SOMMERFELD, Atom- und Spektallinien, 5 Aufl Braunschweig 1928, E. BACK u. A. LANDÉ, Zeeman-Effekt und Multiplettstruktur Berlin 1925

deren Schwingungszahlen ν_1, ν_2, ν_3 sind. Wirkt auf diese ein Magnetfeld \mathfrak{H} , so wird die einfache KEPLER-Ellipse nach einem Satz von LARMOR¹ mit einer gewissen Umlaufszahl o um die Feldrichtung zu rotieren beginnen, deren Betrag (LARMOR-Präzession)

$$o = \frac{eH}{4\pi mc}$$

Ist für ein mit der Umlaufszahl o rotierendes Achsensystem bleibt also die Elektronenbahn ungeändert und mit Hilfe der Transformation

$$\begin{aligned} X(t) &= x(t) \cos 2\pi t o - y(t) \sin 2\pi t o, \\ Y(t) &= y(t) \sin 2\pi t o + x(t) \cos 2\pi t o, \end{aligned} \quad Z(t) = z(t),$$

die die Koordinaten des ruhenden Systems x, y, z mit denen des bewegten Systems X, Y, Z verknüpft, wenn die Rotation im Sinne $x \rightarrow y$ um die Z -Achse erfolgt, wenn also die Z -Achse parallel zur Richtung der Kraftlinien ist, ergibt sich schließlich

$$\left. \begin{aligned} X(t) &= \sum_n \left\{ \frac{1}{2} \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \cos[2\pi t(\nu_n + o) - \delta_n] - \frac{1}{2} \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \sin[2\pi t(\nu_n - o) - \delta'_n] \right\}, \\ Y(t) &= \sum_n \left\{ \frac{1}{2} \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \sin[2\pi t(\nu_n + o) - \delta_n] + \frac{1}{2} \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \cos[2\pi t(\nu_n - o) - \delta'_n] \right\}, \\ Z(t) &= \sum_n C_n \cos(2\pi t \nu_n - \gamma_n) \end{aligned} \right\} \quad (81)$$

Daraus ergeben sich neben der Grundschiwingung modifizierte Schwingungen, deren Schwingungszahlen $\nu_n + o, \nu_n - o$ sind.

In Erscheinung treten je nach der Beobachtungsrichtung entweder Transversaleffekt (Quereffekt), gekennzeichnet durch eine Aufspaltung in drei linearpolarisierte Schwingungen, deren mittelste parallel zu den Kraftlinien ist und als π -Komponente bezeichnet wird, während die äußeren senkrecht zu den Kraftlinien schwingen und σ -Komponenten genannt werden, oder der Longitudinaleffekt (Langseffekt), bei dem zwei entgegengesetzt zirkular polarisierte Linien zu beobachten sind. Die π -Komponente ist doppelt so stark wie die σ -Komponenten, beide Glieder des Langseffektes haben gleiche Intensität, und zwar

$$J^+ = J^- = \frac{1}{2}(A_n^2 + B_n^2) = \frac{1}{2} C_n^2 \quad (82)$$

Für die positive und negative Verschiebung der Komponenten ergibt sich somit bei Annahme des Wertes $e/m = 1,77 \cdot 10^{-7}$, der umgekehrt auch durch Spektralbeobachtungen bestimmt werden kann,

$$\Delta\nu = 4,70 \cdot 10^{-5} H,$$

welche Beziehung zur Ermittlung der Feldstärke dienen kann. Zu letzterem Zwecke eignen sich besonders die Linien Mg 5168, Zn 4680, Sr 4327, Cd 4678, Hg 4047 sowie Al 3944 und 3961.

Die einfachen Zerlegungstypen sind verhältnismäßig selten, die den angegebenen Regeln nicht genügenden anomalen Zerlegungsbilder haben jedoch ein besonderes Interesse gefunden, weil sie zu weiterem Ausbau der Theorie anregen. Wenn auch die Schwierigkeiten bei der Erklärung der einzelnen Typen noch nicht vollständig behoben sind, so sind doch die allgemeinen Grundlagen schon geklärt. Die VOIGTSche Theorie² ergibt die anomalen Effekte einschließlich

¹ Phil Mag (5) 44, S 503 (1897)

² W VOIGT, Magneto-optik in GRAETZ, Handb der Elektrizität und des Magnetismus IV (1915)

des Überganges zum PASCHEN-BACK-Effekt, also der Umwandlung in den normalen Effekt bei Einwirkung starkerer Felder, und weitere Klärung ist durch die Theorie von BOHR, SOMMERFELD, DEBYE¹ u. a. erzielt worden.

Zur näheren Diskussion dieser anomalen Fälle ist es wichtig, eine bestimmte Bezeichnungsweise für die Linien festzulegen, da verschiedene Bezeichnungsarten in Gebrauch sind. Ausgehend von der BOHRschen Grundbedingung, die die Frequenz einer Spektrallinie in Abhängigkeit von zwei Energiestufen E_a und E_e in der Form

$$\nu = \frac{1}{h} (E_a - E_e) \quad (83)$$

darstellt, in der h das PLANCKsche Wirkungsquantum ist, ergeben sich also für die schon in der älteren Spektroskopie bekannten Linienserien die einzelnen Schwingungen als Kombinationen einzelner Terme S, P, D, F , (Abkürzung für Scharfe Serie, Prinzipalserie, Diffuse Serie, Fundamentalserie, auch in gleicher Reihenfolge als II Nebenserie, Hauptserie, I Nebenserie, BERGMANN-Serie bezeichnet), die als charakteristisch für die Atome angesehen werden müssen. Nach PRESTON² ist für alle Linien derselben Serie dieselbe Zerlegung zu erwarten (PRESTONsche Regel), so daß dieses Verhalten zur Festlegung der Serien benutzt werden kann, zumal auch korrespondierende Linien verschiedener Elemente in gleicher Weise zerlegt werden, jedoch ist die Gültigkeit dieser Regel, die durch die LANDÉsche g -Formel erklärbar ist, auf einfachere Formen beschränkt und gilt für „verzweigte“ Terme nicht mehr streng³.

Für die Darstellung der Schwingungszahlen der erwähnten Serien ist von RYDBERG⁴ die Form

$$\nu = A - B = R \left(\frac{1}{(m+a)^2} - \frac{1}{(n+b)^2} \right) \quad (84)$$

benutzt worden, in der R eine universelle Konstante ($R = 109675 \text{ cm}^{-1}$) ist, a und b Konstanten sind, die für die Elemente kennzeichnend sind, während m für eine bestimmte Serie konstant ist und n die Reihe der ganzen Zahlen durchläuft. Die durch den ersten Ausdruck gegebenen Grenzterme sind nicht unabhängig voneinander, vielmehr haben beide Nebenserien gleiche Grenzen, und die Differenz der Grenzen der Hauptserie und der Nebenseite ist gleich der Wellenzahl der ersten Linie der Hauptserie (RYDBERG-SCHUSTERsche Regel). Für die Hauptserie und die beiden Nebenserien existieren somit nur zwei Konstanten s und p , zu denen noch eine weitere „ f “ bei der Aufstellung des Ausdruckes für die BERGMANN-Serie (Fundamentalserie) tritt.

Damit erhält man die für die Einzelserien gültige Darstellung

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Scharfe Serie} & \nu = R \left(\frac{1}{(2+p)^2} - \frac{1}{(n+s)^2} \right), \quad n = 2, 3, \dots \\ \text{Prinzipalserie} & \nu = R \left(\frac{1}{(1+s)^2} - \frac{1}{(n+p)^2} \right), \quad n = 2, 3, \dots \\ \text{Diffuse Serie} & \nu = R \left(\frac{1}{(2+p)^2} - \frac{1}{(n+d)^2} \right), \quad n = 3, 4, \dots \\ \text{Fundamentalserie} & \nu = R \left(\frac{1}{(3+d)^2} - \frac{1}{(n+f)^2} \right), \quad n = 4, 5, \dots \end{array} \right\} \quad (85)$$

¹ N. BOHR, On the Quantum Theory of Line Spectra. Kopenhagen 1918 u. 1922, Ann d Phys 71, S 277 (1923), A. SOMMERFELD, Ann d Phys 51, S 1 (1916), 53, S 527 (1917), P. E. DEBYE, Phys Z 17, S 507 (1916).

² Phil Trans R S Dubl (2) 7, S 7 (1899), C. RUNGE u. F. PASCHEN, Abh Akad Berl 32, S 720 (1902), Ap J 15, S 235 u. 336 (1902), 16, S 118 (1902).

³ E. BACK, Z f Phys 37, S 193 (1926), s. auch E. BACK, Diss. Tübingen 1921.

⁴ Svenska Vet Akad 23, Nr 11 (1890), Phil Mag (5) 29, S 331 (1890).

aus der sich die symbolische Darstellung

$$\left. \begin{array}{ll} \text{II NS} & \nu = 2p - ns, \\ \text{HS} & \nu = 1s - np, \\ \text{I NS} & \nu = 2p - nd, \\ \text{BS} & \nu = 3d - nf \end{array} \right\} \quad (86)$$

unmittelbar erklärt. Eine weitere Fortsetzung dieses Schemas führt zu den „Über-Bergmannserien“

$$\left. \begin{array}{ll} \nu = 4f - ng, & n = 5, 6, \\ \nu = 5g - nh, & n = 6, 7, \end{array} \right\} \quad (86a)$$

Weitere nicht unmittelbar den Serienlinien zuzuordnende beobachtete Linien können in Anlehnung an die Seriedarstellung durch „Kombination“ bestimmter Terme gefunden werden, wobei jedoch eine Reihe an sich möglicher Kombinationen durch eine Auswahlregel, die die zulässigen Quantensprünge begrenzt, ausgeschlossen wird, ähnliche Regeln gelten auch für die ZEEMAN-Komponenten (s weiter unten)

Bei komplexen Strukturen, d. h. solchen, bei denen die Glieder der einzelnen Serien nicht mehr einfach sind, sind mehrere Termfolgen zu berücksichtigen, denen daher Sonderwerte $p_1, p_2, d_1, d_2, f_1, f_2$ an Stelle von p, d, f zuzuschreiben sind¹, bei komplizierteren Linien müssen weitere Konstanten eingeführt werden. Solange nur verhältnismäßig einfache Linien bekannt waren, konnte die Unterscheidung auch in der Weise vorgenommen werden, daß für Einfachterme (Singuletterme) große lateinische Buchstaben (S, D, P, F), für Dubletterme kleine gotische Buchstaben ($\mathfrak{s}, \mathfrak{p}, \mathfrak{d}, \mathfrak{f}$), für Tripletterme kleine lateinische Buchstaben (s, p, d, f) gewählt wurden. Hohe Multiplizitäten führen hierbei zu Schwierigkeiten, und es ist daher von LANDÉ² die folgende Bezeichnungsweise vorgeschlagen worden. Als oberer Index wird an die durch n bezeichnete Laufzahl, die als Hauptquantenzahl anzusehen ist, die Zahl der Multiplizität angehängt, als unterer Index die azimutale Quantenzahl $k = 1, 2, 3$ entsprechend den s, p, d -Termen und die innere Quantenzahl j (resultierende Quantenzahl), so daß das Symbol in allgemeiner Form n^k_j geschrieben werden kann.

Daneben wird noch benutzt eine auf RUSSELL und SAUNDERS³ zurückgehende Schreibweise, bei der die allgemeine Laufzahl n beibehalten wird, die genaue Kennzeichnung erfolgt durch die Buchstaben S, P, D, F , denen als oberer (vorderer) Index die die Multiplizität bezeichnende Zahl, als unterer (hinterer) Index die die Terme unterscheidende Zahl beigelegt wird.

Somit wurde gelten

Singuletterme

nach PASCHEN	nS	nP	nD	nF
nach LANDÉ	n^1_{10}	n^1_{21}	n^1_{32}	n^1_{43}
nach RUSSELL u SAUNDERS	n^1S_0	n^1P_1	n^1D_2	n^1F_3

Dubletterme

nach PASCHEN	$n\mathfrak{s}$	$n\mathfrak{p}_1$	$n\mathfrak{p}_2$	$n\mathfrak{d}_1$	$n\mathfrak{d}_2$	$n\mathfrak{f}_1$	$n\mathfrak{f}_2$
nach LANDÉ	n^2_{11}	n^2_{22}	n^2_{31}	n^2_{32}	n^2_{32}	n^2_{44}	n^2_{48}
nach RUSSELL u SAUNDERS	n^2S_1	n^2P_2	n^2P_1	n^2D_3	n^2D_2	n^2F_4	n^2F

¹ A. SOMMERFELD, Ann d Phys 63, S 121 (1920)

² Z f Phys 5, S 231 (1921)

³ Ap J 61, S 38 (1925), s. auch den zusammenfassenden Bericht von A. JOOS, Die Physik I, S 81 (1933)

Tripletterme

nach PASCHEN	ns	$n\dot{p}_1$	$n\dot{p}_2$	$n\dot{p}_3$	$n\dot{d}_1$	$n\dot{d}_2$	$n\dot{d}_3$
nach LANDÉ	n_{11}^1	n_{22}^1	n_{31}^1	n_{20}^1	n_{33}^1	n_{32}^1	n_{31}^1
nach RUSSELL u SAUNDERS	n^3S_1	n^3P_2	n^3P_1	n^3P_0	n^3D_3	n^3D_2	n^3D_1

24 Zerlegungstypen Die allgemein geltende Formel (83) muß auch für die Zerlegung im Magnetfeld beachtet werden. Die magnetische Zusatzenergie für ein Atom mit dem magnetischen Moment \mathfrak{M} im Magnetfeld ξ ist

$$\Delta W = -|\mathfrak{M}| |\xi| \cos(\mathfrak{M}, \xi)$$

Diese allgemeine Beziehung wurde für die Verschiebung der im Magnetfeld ausgesandten Linie gegen die feldlose Linie ergeben

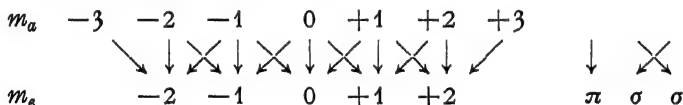
$$\Delta\nu = \Delta\nu_a - \Delta\nu_e = 2\pi o \left(\frac{M_a}{h} - \frac{M_e}{h} \right) = o(m_a - m_e),$$

wobei o die Umlaufszahl der präzessierenden Kreiselachse ist und m_a und m_e die Werte

$$m_a = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm j_a, \quad m_e = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm j_e$$

annehmen können. Zulässig sind aber nur diejenigen Kombinationen, die der folgenden Auswahlregel genügen

Die aquatoriale Quantenzahl m darf nur um 0 oder ± 1 springen. Der Sprung 0 gibt Anlaß zu einer parallel zum Feld polarisierten Strahlung (π -Komponente), der Sprung $m_a - m_e$ liefert zirkuläre Komponenten (σ -Komponenten), die durch das beigefügte Schema angedeutet sind, aus dem auch die Möglichkeit mehrfacher Entstehungsart hervorgeht



Eine vollständige Erklärung der komplizierteren Zerlegungen ist mit ganzen Quantenzahlen nicht möglich. Es ist erforderlich, auch halbe Quantenzahlen zuzulassen. Für gerade Multipletts gilt

$$m = \pm \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots,$$

für ungerade

$$m = \pm 0, 1, 2, 3, \dots,$$

und die möglichen Werte sind für schwache Magnetfelder durch die inneren Quantenzahlen J begrenzt gemäß

$$-(J - \frac{1}{2}) \leq m \leq +(J - \frac{1}{2})$$

Der Vergleich mit der klassischen Theorie gibt Anhaltspunkte für die Intensität und die Polarisation der im Magnetfeld emittierten Strahlung (Korrespondenzprinzip). Demgemäß sollen die $m_a - m_e = 0$ entsprechenden Schwingungen proportional C_n^2 sein, solche, die $m_a - m_e = \pm 1, \pm 2$, entsprechen, nur mit verschwindender Intensität auftreten, wenn sie parallel zur Feldrichtung polarisiert sind, zirkuläre Schwingungen in der XY-Ebene haben bei $m_a - m_e = \pm 1$ Intensitäten proportional $\frac{1}{2} \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$.

Die komplizierteren Zerlegungen lassen sich ausdrücken als rationale (klein-zahlige) Vielfache des Abstandes der normalen Zerlegungstypen, für die

Tabelle 6 ZEEMAN-Termkombinationen

$\begin{array}{c} \bar{s} \quad \begin{array}{cccc} & -\frac{1}{1} & & \frac{1}{1} \\ & \swarrow & \downarrow & \searrow \\ p_1 & -\frac{6}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{2}{3} & \frac{6}{3} \end{array} \\ (\bar{s}p_1) \quad \pm \frac{(1) \ 8 \ 5}{3} \end{array}$	$\begin{array}{c} \bar{s} \quad \begin{array}{cccc} & -\frac{1}{1} & & \frac{1}{1} \\ & \swarrow & \downarrow & \searrow \\ p_2 & -\frac{1}{3} & & \frac{1}{3} \end{array} \\ (\bar{s}p_2) \quad \pm \frac{(2) \ 4}{3} \end{array}$	
$\begin{array}{c} p_1 \quad \begin{array}{cccc} -\frac{6}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{2}{3} & \frac{6}{3} \\ \downarrow & \swarrow & \downarrow & \searrow \\ b_2 & -\frac{6}{5} & -\frac{2}{5} & \frac{2}{5} & \frac{6}{5} \end{array} \\ (p_1b_2) \quad \pm \frac{(4) \ (12) \ 8 \ 18 \ 24}{15} \end{array}$	$\begin{array}{c} p_2 \quad \begin{array}{cccc} & \frac{1}{3} & & \frac{1}{3} \\ & \swarrow & \downarrow & \searrow \\ b_2 & -\frac{6}{5} & -\frac{2}{5} & \frac{2}{5} & \frac{6}{5} \end{array} \\ (p_2b_2) \quad \pm \frac{(1) \ 11 \ 18}{15} \end{array}$	
$\begin{array}{c} p_1 \quad \begin{array}{cccc} -\frac{6}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{2}{3} & \frac{6}{3} \\ \downarrow & \swarrow & \downarrow & \searrow \\ b_1 & -\frac{15}{5} & -\frac{9}{5} & -\frac{3}{5} & \frac{3}{5} & \frac{9}{5} & \frac{15}{5} \end{array} \\ (p_1b_1) \quad \pm \frac{(1) \ (3) \ 15 \ 17 \ 19 \ 21}{15} \end{array}$		
$\begin{array}{c} s \quad \begin{array}{cccc} & -2 & & 0 & & 2 \\ & \swarrow & \downarrow & \searrow & \downarrow & \swarrow \\ p_1 & -\frac{6}{2} & -\frac{3}{2} & 0 & \frac{3}{2} & \frac{6}{2} \end{array} \\ (sp_1) \quad \pm \frac{(0) \ (1) \ 2 \ 3 \ 4}{2} \end{array}$	$\begin{array}{c} s \quad \begin{array}{cccc} & -2 & & 0 & & 2 \\ & \swarrow & \downarrow & \searrow & \downarrow & \swarrow \\ p_2 & -\frac{3}{2} & & 0 & & \frac{3}{2} \end{array} \\ (sp_2) \quad \pm \frac{(1) \ 3 \ 4}{2} \end{array}$	$\begin{array}{c} s \quad \begin{array}{cccc} & -2 & & 0 & & 2 \\ & \swarrow & \downarrow & \searrow & & \\ p_3 & & & 0 & & \end{array} \\ (sp_3) \quad \pm \frac{(0) \ 4}{2} \end{array}$
$\begin{array}{c} p_1 \quad \begin{array}{cccc} -\frac{6}{2} & -\frac{3}{2} & 0 & \frac{3}{2} & \frac{6}{2} \\ \downarrow & \swarrow & \downarrow & \searrow & \downarrow & \swarrow \\ d_3 & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & & \end{array} \\ (p_1d_3) \quad \pm \frac{(0) \ (2) \ 1 \ 3 \ 5}{2} \end{array}$	$\begin{array}{c} p_2 \quad \begin{array}{cccc} -\frac{3}{2} & & 0 & \frac{3}{2} \\ \downarrow & & \swarrow & \downarrow \\ d_3 & -\frac{1}{2} & & 0 & \frac{1}{2} \end{array} \\ (p_2d_3) \quad \pm \frac{(1) \ 2 \ 3}{2} \end{array}$	$\begin{array}{c} p_3 \quad \begin{array}{cccc} & & & 0 \\ & \swarrow & \downarrow & \searrow \\ d_3 & -\frac{1}{2} & & 0 & \frac{1}{2} \end{array} \\ (p_3d_3) \quad \pm \frac{(0) \ (1)}{2} \end{array}$
$\begin{array}{c} p_1 \quad \begin{array}{cccc} -\frac{6}{2} & -\frac{3}{2} & 0 & \frac{3}{2} & \frac{6}{2} \\ \downarrow & \swarrow & \downarrow & \searrow & \downarrow & \swarrow \\ d_2 & -\frac{14}{6} & -\frac{7}{6} & 0 & \frac{7}{6} & \frac{14}{6} \end{array} \\ (p_1d_2) \quad \pm \frac{(2) \ (4) \ 5 \ 7 \ 9 \ 11}{6} \end{array}$	$\begin{array}{c} p_2 \quad \begin{array}{cccc} & -\frac{3}{2} & & 0 & & \frac{3}{2} \\ & \swarrow & \downarrow & \searrow & \downarrow & \swarrow \\ d_2 & -\frac{14}{6} & -\frac{7}{6} & 0 & \frac{7}{6} & \frac{14}{6} \end{array} \\ (p_2d_2) \quad \pm \frac{(0) \ (2) \ 5 \ 7 \ 9}{6} \end{array}$	
$\begin{array}{c} p_1 \quad \begin{array}{cccc} -\frac{6}{2} & -\frac{3}{2} & 0 & \frac{3}{2} & \frac{6}{2} \\ \downarrow & \swarrow & \downarrow & \searrow & \downarrow & \swarrow \\ d_1 & -\frac{12}{3} & -\frac{8}{3} & -\frac{4}{3} & 0 & \frac{4}{3} & \frac{8}{3} & \frac{12}{3} \end{array} \\ (p_1d_1) \quad \pm \frac{(0) \ (1) \ (2) \ 8 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10}{6} \end{array}$		

Für die schon erwähnte Termkombination ist

$$\begin{array}{cccc}
 \text{aquatoriale Quantenzahl} & \frac{-3}{2} & \frac{-1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{3}{2} \\
 \frac{\Delta W}{o \hbar} \text{ von } b_2 & \frac{-6}{5} & \frac{-2}{5} & \frac{+2}{5} & \frac{+2}{5} \\
 & \searrow & \downarrow & \swarrow & \downarrow \\
 \frac{\Delta W}{o \hbar} \text{ von } p_2 & & \frac{-1}{3} & \frac{+1}{3} & \\
 \frac{\Delta \nu}{o \hbar} \text{ von } (p_2 b_2) & \frac{-13}{15} & \frac{-11}{15} & \left(\frac{-1}{15}\right) & \left(\frac{+1}{15}\right) & \frac{+11}{15} & \frac{+13}{15}
 \end{array}$$

Die nach diesen Regeln erhaltene grundlegende Tabelle, die von LANDÉ zusammengestellt worden ist, ist experimentell weitgehend bestätigt und konnte sogar zu Voraussagen über mögliche Zerlegungstypen benutzt werden¹

Die klassischen Theorien sowie die Quantentheorien von DEBYE und SOMMERFELD konnten eine ausreichende Erklärung für die anomalen Effekte nicht geben, selbst dann noch nicht, als die mit der ursprünglichen Quantentheorie nicht vereinbare Annahme halber Quantenzahlen gemacht wurde. Für die Atome höherer Stufe lassen sich die Aufspaltungsgrößen aber nach LANDÉ² durch Einführung eines „Aufspaltungsfaktors“ g in der Form darstellen

$$\frac{\Delta \nu}{o} = mg,$$

in der m von einem Großwert in ganzzahligen Intervallen abnimmt. So ergibt sich für die Aufspaltungsgrößen $\pm \frac{1}{2}g$, $\pm \frac{3}{2}g$, $\pm \frac{5}{2}g$ des Dubletts b_1 die Zerlegung bei $g = \frac{1}{2}$

$$\frac{\Delta \nu}{o} = mg = \pm \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{2}, \quad \pm \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2}, \quad \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}$$

Die Faktoren g , die mit dem jedesmaligen m_{\max} die Term aufspaltungen vollständig bestimmen, sind unter Beifügung des Wertes J in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Hierbei ist zu beachten, daß der Wert von m_{\max} um $\frac{1}{2}$ kleiner ist als der Wert J für den betreffenden Term. m liegt also zwischen den Grenzen m_{\max} und $-m_{\max}$.

Tabelle 7

Term	S	P	D	\sharp	p_1	p_2	b_1	b_2	s	p_1	p_2	p_3	d_1	d_2	d_3
g	$\frac{0}{0}$	1	1	$\frac{2}{1}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	0	$\frac{4}{3}$	$\frac{7}{6}$	$\frac{1}{2}$
m_{\max}	0	1	2	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{3}{2}$	1	0	1	0	3	2	1
J	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{2}$	1	2	1	3	2	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{3}{2}$

Die Berechnung von g aus den Quantenzahlen R (Rumpfqquantenzahl), K (azimutale Quantenzahl) und J (Gesamtimpuls, innere Quantenzahl) kann nach der Formel

$$g = \frac{3}{2} + \frac{R^2 - K^2}{2(J^2 - \frac{1}{4})}$$

oder in symmetrischer Form

$$g = 1 + \frac{(J + \frac{1}{2})(J - \frac{1}{2}) + (R + \frac{1}{2})(R - \frac{1}{2}) - (K + \frac{1}{2})(K - \frac{1}{2})}{2(J + \frac{1}{2})(J - \frac{1}{2})}$$

erfolgen

¹ C RUNGE, Phys Z 8, S 232 (1907), W LOHMANN, Inaug-Diss Halle 1907, TAKAMINE u YAMADA, Proc Tokyo Math Phys Soc 7, S 277 (1914), A LANDÉ, Z f Phys 5, S 231 (1921)

² Z f Phys 5, S 231 (1921), 7, S 398 (1921), 15, S 189 (1923), 22, S 417 (1927)

Durch Arbeiten von HEISENBERG und PAULI¹, besonders aber durch die Hypothese des Kreiselektrons, die von UHLENBECK und GOUDSMIT² eingeführt worden ist, ist weitere Aufklärung geschaffen worden. Für den mechanischen Drehimpuls (Spin) ist beim Einzelektron eine halbe Quanteneinheit, für das magnetische Moment eine volle Einheit anzunehmen. Die große Achse der Bahnnormale ist gegeben durch die Hauptquantenzahl n , die kleine Achse durch die Nebenquantenzahl k . Bei Atomen mit mehreren Elektronen ist noch die Wechselwirkung der Einzelektronen zu berücksichtigen, deren Sonderfälle, die RUSSELL-SAUNDERS-Koppelung und die ($j - j$)-Koppelung, einer unmittelbaren Behandlung fähig sind. Die Spinresultante ist bei gerader Elektronenzahl 0, 1, 2, ..., bei ungerader halbzahlig. Bei zwei Elektronen ergeben sich Singulett- oder Triplettssysteme, bei größerer Zahl höhere Multiplizitäten. Der Unterschied zwischen den beiden Koppelungsarten ist darin zu sehen, daß bei der RUSSELL-SAUNDERS-Koppelung (LS -Koppelung) im wesentlichen Wechselwirkungen zwischen den Elektronenbahnen unter sich auftreten, im anderen Falle ist hauptsächlich die Wirkung zwischen Bahn und Spin des Einzelektrons maßgebend.

Der LANDÉsche Anomalefektor g ergibt sich dann als Summe des für den normalen Zustand berechneten magnetischen Momentes und des zeitlichen Mittels der in die Richtung von J fallenden Spinkomponenten. Für allgemeine Koppelungsfälle ergeben sich für g keine rationalen Werte, ferner ist zu beachten, daß der Grad der Koppelung innerhalb einer Serie sich ändern kann und daß somit die PRESTONSche Regel keine allgemeine Gültigkeit beanspruchen kann³.

Unter Zugrundelegung der bereits definierten Quantenzahlen J und K ist von LANDÉ die Tabelle 8 (s. f. S.) berechnet worden.

Für die Linie $\text{Sc I } \lambda = 3996,61^2 (D_2 D_3)$ mit $J = 2, J = 3, g = \frac{1}{2}, g = \frac{1}{2}$ ergibt sich das Schema (siehe Tab. 8)

$$\begin{array}{ccccccc}
 {}^2D_3 & \frac{-15}{5} & \frac{-9}{5} & \frac{-3}{5} & \frac{+3}{5} & \frac{+9}{5} & \frac{+15}{5} \\
 & \searrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\
 {}^2D_2 & & \frac{-6}{5} & \frac{-2}{5} & \frac{+2}{5} & \frac{+6}{5} & \\
 & \searrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \searrow \\
 & \frac{-9}{5} & \frac{-7}{5} & \frac{-5}{5} & \frac{-3}{5} & \frac{-1}{5} & \frac{+1}{5} & \frac{+3}{5} & \frac{+5}{5} & \frac{+7}{5} & \frac{+9}{5} = \pm \frac{(1, 3) \ 5 \ 7 \ 9}{5}
 \end{array}$$

Daher

berechn	1,80	1,40	1,00	(0,60)	(0,20)	(0,60)	1,00	1,40	1,80
beob	1,79	1,40	1,00	(0,62)	(0,19)	(0,56)	0,98	1,40	1,76

Ähnlich gut sind auch die Übereinstimmungen bei anderen Beobachtungen, jedoch zeigt sich, daß bei höheren Atomnummern und bei hoher liegenden Termniveaus immerhin beträchtliche Differenzen vorkommen können, die aber durch die schon erwähnte mögliche Änderung des Koppelungsgrades erklärt werden können⁴.

¹ W. HEISENBERG, Zf Phys 32, S 841 (1925), W. PAULI, ebenda 20, S 371 (1924), 31, S 373 u 765 (1925)

² Physica 5, S 266 (1925), Zf Phys 35, S 618 (1926), Nature 117, S 264 (1926)

³ Für die Entwicklung der Theorie H. A. LORENTZ, Die Theorie des Zeemaneffektes, Handb der Radiologie VI, Leipzig 1924, E. BUCHWALD, Das Korrespondenzprinzip, Braunschweig 1924, M. BORN, Vorlesungen über Atomdynamik, Berlin 1925, W. PAULI, Quantentheorie, Handb der Physik XXIII (1926)

⁴ S. GOUDSMIT, J. v. D. MARK u. P. ZEEMAN, Versl Akad Amsterdam 33, S 10 (1925), W. F. MEGGERS u. C. C. KIESS, J. Amer Opt Soc 12 (1926)

Tabelle 8 Aufspaltungsfaktoren g

1ν $K \quad J$	$= 1$	2	3	4	5	6	7		$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{9}{2}$	$\frac{11}{2}$	$\frac{13}{2}$	$\frac{15}{2}$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{9}{2}$	$\frac{11}{2}$	$\frac{13}{2}$	$\frac{15}{2}$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{1}{2}$	0 0								2							
$\frac{3}{2}$		1							$R = \frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{4}{3}$					
$\frac{5}{2}$			1							$\frac{4}{5}$	$\frac{5}{6}$					
$\frac{7}{2}$				1							$\frac{6}{7}$	$\frac{8}{7}$				
$\frac{9}{2}$					1							$\frac{8}{9}$	$\frac{10}{9}$			
$\frac{1}{2}$		2							2							
$\frac{3}{2}$	0 0	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$						$R = \frac{3}{2}$	$\frac{8}{3}$	$\frac{26}{15}$	$\frac{8}{5}$				
$\frac{5}{2}$		$\frac{1}{2}$	$\frac{7}{6}$	$\frac{4}{3}$						0	$\frac{6}{5}$	$\frac{48}{35}$	$\frac{10}{7}$			
$\frac{7}{2}$			$\frac{2}{3}$	$\frac{13}{12}$	$\frac{5}{4}$						$\frac{2}{5}$	$\frac{36}{35}$	$\frac{78}{63}$	$\frac{4}{3}$		
$\frac{9}{2}$				$\frac{3}{4}$	$\frac{21}{20}$	$\frac{6}{5}$					$\frac{4}{7}$	$\frac{62}{63}$	$\frac{116}{99}$	$\frac{14}{11}$		
$\frac{1}{2}$			2						2							
$\frac{3}{2}$		$\frac{5}{2}$	$\frac{11}{6}$	$\frac{5}{3}$					$R = \frac{5}{2}$	$\frac{12}{5}$	$\frac{66}{35}$	$\frac{12}{7}$				
$\frac{5}{2}$	0	$\frac{5}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$					$\frac{10}{3}$	$\frac{28}{15}$	$\frac{58}{35}$	$\frac{100}{63}$	$\frac{14}{9}$		
$\frac{7}{2}$		0	1	$\frac{5}{4}$	$\frac{27}{20}$	$\frac{7}{5}$				$\frac{2}{3}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{46}{35}$	$\frac{88}{63}$	$\frac{142}{99}$	$\frac{16}{11}$	
$\frac{9}{2}$			$\frac{1}{3}$	$\frac{11}{12}$	$\frac{23}{20}$	$\frac{19}{15}$	$\frac{4}{3}$			0	$\frac{6}{7}$	$\frac{8}{7}$	$\frac{14}{11}$	$\frac{192}{143}$	$\frac{18}{13}$	
$\frac{1}{2}$				2					2							
$\frac{3}{2}$			$\frac{7}{3}$	$\frac{23}{12}$	$\frac{7}{4}$				$R = \frac{7}{2}$		$\frac{16}{7}$	$\frac{122}{63}$	$\frac{16}{9}$			
$\frac{5}{2}$		3	2	$\frac{7}{4}$	$\frac{33}{20}$	$\frac{8}{5}$					$\frac{14}{5}$	$\frac{72}{35}$	$\frac{38}{21}$	$\frac{56}{33}$	$\frac{18}{11}$	
$\frac{7}{2}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	3			4	2	$\frac{12}{7}$	$\frac{34}{21}$	$\frac{52}{33}$	$\frac{222}{143}$	20
$\frac{9}{2}$		$-\frac{1}{2}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{7}{6}$	$\frac{13}{10}$	$\frac{41}{30}$	$\frac{59}{42}$	$\frac{10}{7}$		$-\frac{4}{3}$	$\frac{14}{15}$	$\frac{44}{35}$	$\frac{86}{63}$	$\frac{140}{99}$	$\frac{206}{143}$	$\frac{284}{195}$
K/J	1	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{9}{2}$	$\frac{11}{2}$	$\frac{13}{2}$	$\frac{15}{2}$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta\nu$	= 1	2	3	4	5	6	7		$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{9}{2}$	$\frac{11}{2}$	$\frac{13}{2}$	$\frac{15}{2}$	

Nach der Regel von BURGER und DORGELO¹ sind auch für die zusammengesetzten Multipletts Angaben über die Intensitäten möglich. Schreibt man

¹ H B DORGELO, Inaug-Diss Utrecht 1924, H C BURGER u H B DORGELO, Zf Phys 23, S 258 (1924), S ORNSTEIN u H C BURGER, ebenda 28, S 135 (1924), 29, S 241 (1924), 31, S 355 (1925)

die Werte $J/2RK$ eines jeden zu kombinierenden Terms an den oberen und rechten Rand eines Schemas hin, wie es (nach LANDE) für Kombinationen der drei Quartett-p-Terme mit den vier Quartett-b-Termen geschehen ist, so ist für die nach der Auswahlregel verbotenen Kombinationen die Intensität 0 zu setzen, für die erlaubten Kombinationen, bei denen der Sprung von K dem von J entgegengesetzt ist, 1 ($2RK \ 2R'K'$), für die übrigen aber ist dann die Summe übereinanderstehender Intensitätswerte gleich dem zugehörigen oberen Rahmenwert. Gleichzeitig sollen die horizontalen Summen den links stehenden Rahmenwert ergeben. Die so erhaltenen Zahlen geben Relativwerte der Intensitäten

$J/2RK$	1/10	2/10	3/10	4/10	
1/6	5/60	5/60	0	0	n_{31}^1
2/6	1/60	6/60	13/60	0	n_{32}^1
3/6	0	1/60	5/60	24/60	n_{33}^1
	n_{31}^1	n_{32}^1	n_{33}^1	n_{34}^1	$n_{34}^{1'}$

Unter Zugrundelegung dieser Daten ergibt sich dann bei Anwendung des Korrespondenzprinzips für die Aufspaltungsterme das Intensitätsverhältnis der π - und σ -Komponenten, wenn man mit Θ den Winkel zwischen der Kraftlinienrichtung und dem Vektor des resultierenden Impulsmomentes bezeichnet¹

$$\begin{aligned} \sigma_+ \ \pi_0 \ \sigma_- &= \frac{1}{4}(1 + \cos \Theta)^2 \ \sin^2 \Theta \ \frac{1}{4}(1 - \cos \Theta)^2 \quad \text{für } J_a - J_e = \pm 1, \\ \sigma_+ \ \pi_0 \ \sigma_- &= \frac{1}{4}(\sin^2 \Theta) \ \cos^2 \Theta \ \frac{1}{4}\sin^2 \Theta \quad \text{für } J_a - J_e = 0 \end{aligned}$$

Die Regeln, die in erster Näherung Gleichheit der Intensität der symmetrisch zu der zu beeinflussenden Linie liegenden Komponenten verlangen, ferner für den Quereffekt Gleichheit der Intensitätssummen für die π -Komponenten einerseits und die σ -Komponenten andererseits, sind noch verschiedentlich erweitert worden²

Eine strenge quantitative Darstellung ist bisher nicht erzielt worden, doch kann die Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit der Theorie als befriedigend betrachtet werden³, die bei älteren Arbeiten noch vorliegenden Abweichungen sind auf unzureichende Berücksichtigung der Koppelungsverhältnisse zurückzuführen⁴

25 PASCHEN-BACK-Effekt Die Zerlegungskomponenten sollten nach der einfachen Theorie stets Abstände von der Ausgangslage zeigen, die der Feldstärke proportional sind. Bei starken Feldern treten aber neue Erscheinungen auf, die auf eine Beeinflussung durch die Nachbarlinien schließen lassen. Selbst bei kompliziertem Bau der unbeeinflussten Emissionslinien ergibt sich schließlich ein Verhalten, als ob die ursprüngliche Linie einfach wäre, d. h. es ergibt sich bei genügender Stärke der Felder, die freilich in der Praxis nicht immer erreicht werden kann, der normale Zerlegungstyp. Ein Einfluß serienfremder Linien ist dabei nicht vorhanden. Für die verschiedenen Terme ist die zur Erreichung des normalen Verhaltens notwendige Feldstärke verschieden, und es treten somit auch Übergangserscheinungen auf (partieller PASCHEN-BACK-Effekt).

Bei dieser „Normalisierung“ des ZEEMAN-Effektes ist ein Zusammenfließen der einzelnen Zerlegungskomponenten, eine Änderung der Intensitäten und sogar

¹ A. SOMMERFELD u. W. HEISENBERG, Zf. Phys. 11, S. 131 (1922)

² H. HONL, Zf. Phys. 31, S. 340 (1925), Ann. d. Phys. 79, S. 273 (1926), H. N. RUSSFEL, Proc. Nat. Amer. Acad. 11, S. 314 (1925), Nature 115, S. 835 (1925)

³ I. TAMM, Zf. Phys. 34, S. 59 (1925), W. C. VAN GEL, ebenda 33, S. 836 (1925)

⁴ J. B. GREEN u. R. A. LORING, Phys. Rev. 43, S. 459 (1933), C. J. BAKKER, Proc. Ac. Amsterdam 35, S. 82 (1932)

ein Verschwinden einzelner Komponenten zu beobachten, wie es Abb 45 schematisch für die Aufspaltung der *D*-Linien des Natriums zeigt

Eine theoretische Behandlung des genannten Effektes ist von W VOIGT durchgeführt worden. In der vereinfachten SOMMERFELDSchen Darstellung¹ ist die Term-aufspaltung des Dubletts gegeben durch

$$\nu = \nu_s + o m - \frac{\omega}{4K} \pm \frac{1}{2} \sqrt{o^2 + 2 \frac{m}{K} o \omega + \omega^2},$$

wobei ν_s den Schwerpunkt zwischen den Termschwingungszahlen, K die azimutale Quantenzahl, o die LARMOR-Präzession und ω den feldlosen Dublett-Abstand

bedeutet. Für die Sonderfälle $o \ll \omega$ (ZEEMAN-Effekt) und $o \gg \omega$ (PASCHEN-BACK-Effekt) folgen somit Ausdrücke von der Form

$$\nu = \nu_s + \omega \gamma + o m g,$$

die erkennen lassen, daß sowohl die Aufspaltungsfaktoren g wie auch die Intervallfaktoren γ sich mit der Feldstärke ändern, trotzdem besteht zwischen den g - und γ -Werten für schwache und starke Felder eine Beziehung, die als Perma-

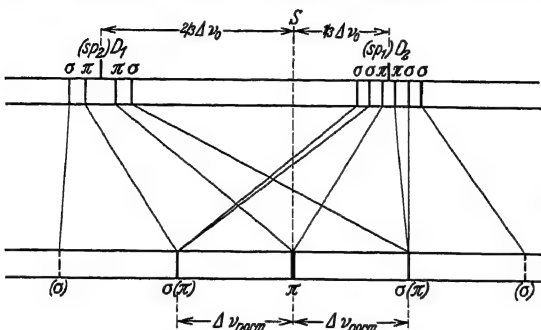


Abb 45 Normalisierung des ZEEMAN-Effektes für die *D*-Linien

nenzgesetz der g - und γ -Summen bezeichnet wird². Hiermit steht in engstem Zusammenhang der Schwerpunktssatz

Zählt man jeden magnetischen Aufspaltungsterm des Termmultipletts mit dem Gewicht 1, so bleibt der Schwerpunkt ν_s des ganzen Termmultipletts bei der magnetischen Aufspaltung seiner Einzelterme bei jeder Feldstärke erhalten.

Beispiele für den PASCHEN-BACK-Effekt sind mehrfach bekannt geworden und bestätigen in den Grundtatsachen die Folgerungen der Theorie³, für die Erweiterungen ist der Nachweis experimentell noch nicht in vollem Umfange gelungen.

Die beobachteten Abweichungen lassen sich aber zum Teil auch durch systematische Fehler der Apparatur oder der Meßverfahren erklären. Jedenfalls werden, worauf schon ZEEMAN hingewiesen hat, Intensität und Polarisation der Schwingungen durch Gitter (und Spalte) wesentlich beeinflusst, weshalb Maßnahmen getroffen werden sollten, die diese Unsicherheiten ausschließen, nach einem Vorschlage von ZEEMAN lassen sich die Einflüsse verringern, wenn man durch Vorschalten geeigneter Quarzplatten vor den Spalt des Spektrographen dafür sorgt, daß beide Schwingungen unter gleichem Winkel mit den Spalt-richtungen und Gitterstrichen auftreten.

26 ZEEMAN-Effekt an Bandenspektren Nach anfänglichen Mißerfolgen gelang es DUFOUR⁴, die magnetische Beeinflussbarkeit der Emissionsbanden von Haloidverbindungen nachzuweisen (CaF_2 , SrF_2 , BaF_2 , SiF_2 , Chloride von Ca,

¹ A. SOMMERFELD, Gott. Nachr. März 1914, Z. f. Phys. 8, S. 257 (1922), C. RUNGE, Ann. d. Phys. 76, S. 266 (1925), A. LANDÉ, Z. f. Phys. 19, S. 112 (1923).

² W. PAULI, Z. f. Phys. 16, S. 155 (1923), 20, S. 371 (1923).

³ KENT, Ap. J. 40, S. 343 (1914), POPOW, Phys. Z. 15, S. 756 (1919), WOOD u. KIMURA, Ap. J. 46, S. 181 u. 197 (1917), FORSTERLING u. HANSEN, Z. f. Phys. 18, S. 26 (1923), P. SKAPITZA u. B. SKINNER, Nature 114, S. 273 (1924).

⁴ J. de Phys. (4) 8, S. 237 (1908).

Sr, Ba) Freilich war es noch nicht möglich, die Wirkungen an den einzelnen Linien zu beobachten, doch zeigten die Bandenkanten deutliche Verschiebungen in der Art des normalen Typus sowohl beim longitudinalen wie beim transversalen Effekt, wenn auch die Polarisationserscheinungen teilweise wenig ausgeprägt waren oder ganz fehlten. Überhaupt ist das Verhalten der Banden und der Bandenlinien, deren Zerlegung von FORTRAT¹ und von DESLANDRES² näher untersucht worden ist, recht verschieden. Es gibt ebensowohl Linien, die in polarisierte Komponenten zerlegt werden, als auch solche, die die erwähnten einfachen Verschiebungen aufweisen, die sich aber als Dubletts erweisen. Die Vereinfachung der Linien von Dubletts und Triplets im Magnetfelde entspricht dem bei Linienspektren bekannten PASCHEN-BACK-Effekt. Der Nachweis durchgehends gültiger Gesetzmäßigkeiten wie bei den Serienlinien ist bisher noch nicht gelungen.³

Den umgekehrten Effekt, nämlich die Zerlegung der Absorptionsbanden flüssiger oder fester Körper, kann man nur beobachten, wenn die Scharfe der Linien durch starke Abkühlung vergrößert worden ist, wie dies von J. BECQUEREL gefunden worden ist.⁴ Besonders geeignet sind Kristalle von Verbindungen der seltenen Erden. Die Erscheinungen werden noch dadurch kompliziert, daß der Einfluß der Kristallorientierung sich auswirkt.

Die Ergebnisse von H. DU BOIS und ELIAS⁵ an Rubin und anderen Kristallen bestätigen diejenigen BECQUERELS hinsichtlich der Zerlegungstypen, stehen aber hinsichtlich der Temperaturabhängigkeit des Effektes insofern im Widerspruch, als nach ersteren die Größe der Aufspaltung mit der Temperatur zunimmt, nach BECQUEREL aber abnimmt.

27 ZEEMAN-Effekt in den Spektren der Sonnenflecke Aus den HALEschen Aufnahmen der Sonnenoberfläche im Lichte einer Spektrallinie läßt sich erkennen, daß auf der Sonne in der Umgebung der Flecken lebhaftes Wirbelbewegungen auftreten, die durch diese Wirbel hervorgerufenen magnetischen Felder erzeugen eine Veränderung der Absorptionslinien in der Nahe der Sonnenflecke, die schon 1866 von NORMAN LOCKYER andeutungsweise beobachtet worden ist.⁶ Eine genauere Untersuchung mit Instrumenten starkerer Dispersion hat gezeigt, daß viele im Sonnenspektrum einfache Linien im Fleckenspektrum als Doppellinien erscheinen. Die erste Deutung solcher als Wirkung reiner Absorption (Umkehr) ist aber nicht mehr zulässig, da HALE⁷ gezeigt hat, daß die Komponenten der zerlegten Linie polarisiert sind, und zwar annähernd entgegengesetzt zirkular, so daß sie dem longitudinalen ZEEMAN-Effekt entsprechen. Es konnte sogar für die Eisenlinien 6213,14, 6301,72, 6302,71, 6337,05 eine vollständige Proportionalität der im Fleckenspektrum beobachteten Abstände der Komponenten und der im Laboratorium gefundenen Zerlegungen im magnetischen Feld festgestellt werden. Die geringere Übereinstimmung bei Titan, Chrom, Natrium und Magnesium kann durch die mit der Höhe abnehmende Intensität des Magnetfeldes und die Verteilung dieser Elemente in der Sonnenatmosphäre erklärt werden.

Wichtig ist, daß bei Beobachtungen in Richtungen, die zur Kraftlinienrichtung geneigt sind, neben dem longitudinalen Effekt auch der transversale auftreten kann und daß dann aus dem Intensitätsverhältnis der beiden Effekten

¹ Recherches magnéto-optiques Paris 1914

² H. DESLANDRES u. V. BURSON, C R 157, S 15 (1913)

³ E. GEHRCKE u. E. LAU, Sitzber Berl Akad 1922, S 453, 1923, S 242

⁴ C R 142—152 (1906—1910)

⁵ Ann d Phys 27, S 233 (1908), 35, S 617 (1911), H. DU BOIS, Phys Z 13, S 128 (1912)

⁶ Proc Roy Soc 15, S 256 (1866) ⁷ Mt Wilson Contr 1908 Nr 30

zugeordneten Komponenten auf die Richtung, aus der Größe der Abstände aber auf die Stärke des Feldes geschlossen werden kann. So hat sich ergeben, daß in den Flecken die magnetische Feldstärke im allgemeinen von der Mitte nach den Rändern hin stark abnimmt, daß aber auch in den von Flecken freien Teilen der Sonnenoberfläche immer noch eine Feldstärke von etwa 50 Gauß für die vertikale Intensität anzunehmen ist. Das durch solche Beobachtungen er-

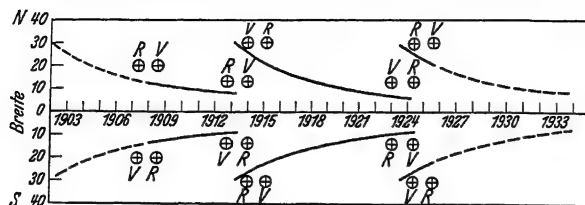


Abb 46 Gesetz der Polaritäten der Sonnenflecke

ren nur die Violett Komponente durchgelassen wurde und somit eine Einteilung in Flecken verschiedener „Polarität“ möglich ist. Für sehr schwache Flecken ist für die Beobachtung eine vor dem Spalt angeordnete Halbwellenlangensplatte benutzt worden. Der Winkel der Kraftlinien gegen die Sonnenoberfläche, der für die Mitte der Flecken etwa 90° beträgt, nimmt auf 0° in der Nähe der Grenze

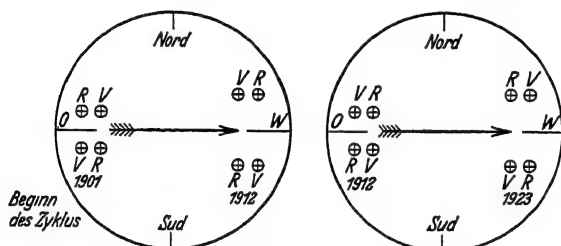


Abb 47 Polaritäten der Sonnenflecke in einer $11\frac{1}{2}$ -jährigen Periode

der Penumbra ab. Zu unterscheiden sind drei Arten von Flecken, nämlich unipolare, bipolare und multipolare. Überwiegend sind die bipolaren Flecke, d. h. solche, die aus zwei Flecken entgegengesetzter Polarität bestehen, wobei ihre Verbindungslinie einen kleinen Winkel mit dem Sonnenäquator bildet. Die Polaritäten in der nördlichen und südlichen Halbkugel sind verschieden und

bleiben während einer $11\frac{1}{2}$ -jährigen Periode erhalten, kehren sich aber mit der Erneuerung ihrer Aktivität in hohen Breiten um, wie dies Abb 46 und 47 andeuten¹.

28. STARK-Effekt Allgemeines Es ist vom Standpunkte der elektromagnetischen Lichttheorie zu erwarten gewesen, daß ein dem ZEEMAN-Effekt vergleichbarer elektrischer Effekt bei der Emission zu beobachten sein mußte. Die verhältnismäßig lange Zeit, die notwendig war, um die elektrische Zerlegung zu finden, erklärt sich daraus, daß die Beobachtungsbedingungen für beide Effekte grundsätzliche Unterschiede aufweisen. Eine beobachtbare magnetische Zerlegung erfordert sehr starke Felder und selbst bei diesen noch Spektralapparate von höchstem Auflösungsvermögen, weil die größten normalerweise erreichbaren Aufspaltungen sich in der Größenordnung von etwa 2 Å bewegen. Eine wesentlich stärkere Aufspaltung erscheint nach dem heutigen Stande der Technik unwahrscheinlich, da die Schwierigkeiten bei Erzeugung stärkerer Felder zu groß werden². Demgemäß bietet die Untersuchung des ZEEMAN-Effekts nur

¹ G E HALE u S B NICHOLSON, Mt Wilson Contr 1919, Nr 165, 1925, Nr 300, S ROSSELAND, ebenda 1925, Nr 302

² H DU BOIS, Z f Instrk 1911, S 362, P WEISS, CR 156, S 1970 (1913), H BOAS u Th PEDERZANI, Z f Phys 19, S 351 (1923), A COTTON, Rev Gén Sc 25, S 626 u 665 (1914)

Aussichten, wenn starke Lichtquellen benutzt werden, die aber bei der elektrischen Beeinflussung ungünstig sind. Die bei den meisten Lichtquellen auftretende Ionisierung und die durch sie bedingte Leitfähigkeit schließt die Anwendung des einfachen Kondensatorprinzips zur Erzeugung des Starkeffekts aus und läßt nur den Ausweg übrig, das natürlich vorhandene elektrische Feld zu benutzen. In den meisten Fällen ist das Feld ziemlich schwach und auch die Intensität läßt sich nicht beliebig steigern, so daß man zur Verwendung von Apparaten mit geringer Dispersion gezwungen ist, die aber auch meist ausreichend sind, weil die elektrische Zerlegung erheblich stärkere Aufspaltungen ergibt.

Zur Beobachtung des Effektes sind nahezu gleichzeitig zwei Anordnungen gefunden worden, nämlich die von J. STARK¹ und diejenige von LO SURDO². Die STARKsche Rohre, die in Abb 48 wiedergegeben ist, enthält die scheibenförmige Anode *A* und ihr gegenüber die durchlocherie Kathode *K*, hinter der die Spannungselektrode *F* in geringem Abstand (1 bis 2 mm) angeordnet ist. Die mit dieser angeschaltete Hilfsspannung ist unabhängig von dem Entladungsstrom und darf erst hinzugefügt werden, wenn die Länge des Kathodendunkelraums hinreichend groß ist.

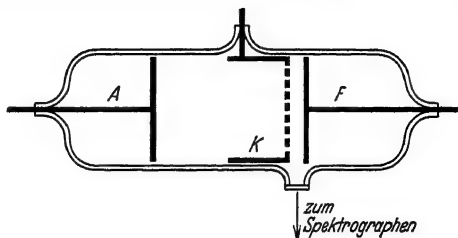


Abb 48 STARKsche Anordnung zur Beobachtung des elektrischen Effektes

Beobachtet wird das Kanalstrahlenspektrum in dem engen Raum zwischen Kathode und Spannungselektrode, die auf die Spannungselektrode auftreffenden Kanalstrahlen zerstauben das Elektrodenmaterial und erzeugen so auch Emission der stärkeren Linien der Elemente, mit denen die Spannungselektrode bedeckt ist.

Die Bestimmung der Feldstärke erfolgt durch Anlegen eines Spannungsmessers an die Elektrode *F* (die Kathode ist geerdet) und Berechnung der Feldstärke aus dem peinlich genau einzuhaltenden Abstand der das Feld begrenzenden Platten. Das Feld ist zwar niemals über die ganze Länge homogen, doch bietet dies den Vorteil, daß die elektrisch beeinflussten Linien einwandfrei von Geistern zu unterscheiden sind. Die Grundform der Zerlegung nach STARK zeigt Abb 49.

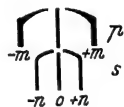


Abb 49 Zerlegungsart für den elektrischen Effekt

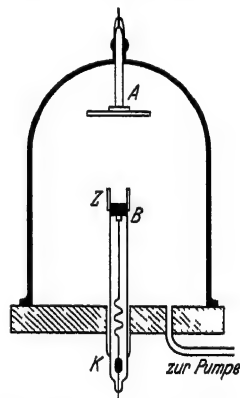


Abb 50 Anordnung nach Lo Surdo zur Beobachtung des elektrischen Effektes

Bei der Lo SURDOSchen, von ANDERSON verbesserten Methode befinden sich Anode *A* (Abb 50) und Kathode *K* in einem weiten Zylinder, über die Eisenkathode *E* ist ein Zylinder *Z* aus geschmolzenem Quarz gesetzt, der einen seitlichen Schlitz von 1 mm Weite hat. Bei starker Belastung entsteht vor der mit dem zu untersuchenden Körper bedeckten Kathode ein hinreichend starkes Feld, um eine deutliche Zerlegung erzeugen zu können. Die Feldstärke nimmt nach ANDERSON linear ab, wenn, wie BROSE nachgewiesen hat³, die Länge des Dunkel-

¹ Elektrische Spektralanalyse chemischer Atome Leipzig 1914

² ANDERSON, Ap J 46, S 104 (1917), siehe auch W. STEUBING, Phys Z 31, S 350 (1930), Ann d Phys (5) 10, S 296 (1931)

³ Ann d Phys 58, S 731 (1919)

raumes groß ist, bei geringen Längen des Dunkelraumes erfolgt schnellere Abnahme¹

Die Bestimmung der Feldstärke stößt bei dieser Methode auf große Schwierigkeiten, zumal bei inhomogenen Feldern, wie sie hier vorliegen, auch der Winkel zwischen Feldrichtung und Ausstrahlungsrichtung nicht unmittelbar festzulegen ist, ferner ist noch die Eigenbewegung der Kanalstrahlen zu beachten, die durch DOPPLER-Effekt eine Linienverbreiterung oder Verschiebung ergeben, sowie deren Polarisationszustand merklich ändern kann. Theoretisch ergibt sich aus dem Ausdruck für die Energie einer ausgezeichneten Quantenbahn

$$E = E_0 + \frac{3R_0\hbar}{8\pi^2 m e} n(n_s - n_\eta)$$

(E_0 = Energie der KEPLER-Ellipse ohne elektrisches Feld, n_k = Quantenzahlen), für die Frequenzen

$$\nu = \nu_0 - \frac{3R_0\hbar}{8\pi^2 m e} [n''(n_s'' - n_\eta'') - n'(n_s' - n_\eta')],$$

wobei sich die n'' auf die Anfangsbahn, die n' auf die Endbahn beziehen

Jede Linie zerfällt also im elektrischen Feld in eine Reihe von Linien, deren Abstand ein ganzzahliges Vielfaches von $\frac{3R_0\hbar}{8\pi^2 m e}$ ist. Für die Polarisationszustände sind die azimuthalen Quantenzahlen k maßgebend. Für $\Delta k = 0$ ist die elektrische Schwingung parallel zum äußeren elektrischen Feld polarisiert (p -Komponenten), für $\Delta k = \pm 1$ treten aber keine zirkular polarisierten Komponenten auf, sondern unpolarisierte. Bei Beobachtung senkrecht zur Richtung des äußeren Feldes treten die s -Komponenten auf, deren elektrischer Vektor senkrecht zum äußeren Feld ist².

Für die p - und s -Komponenten der zur Feldbestimmung benutzten Wasserstofflinien $H\beta$ und $H\gamma$ gibt STARK in Abhängigkeit von der Feldstärke folgende Beziehungen

$$p\text{-Komponenten } \Delta\lambda(H\beta) = 3,0 \cdot 10^{-4} \text{ A/Volt} \times \text{cm}^{-1},$$

$$\Delta\lambda(H\gamma) = 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ A/Volt} \times \text{cm}^{-1},$$

$$s\text{-Komponenten } \Delta\lambda(H\beta) = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ A/Volt} \times \text{cm}^{-1},$$

$$\Delta\lambda(H\gamma) = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ A/Volt} \times \text{cm}^{-1}$$

Es ist zu bemerken, daß die Proportionalität der Aufspaltungen mit der Feldstärke nur bis zu gewissen Grenzen der Feldstärke gewahrt bleibt. Allgemein wäre zu setzen³

$$\Delta\nu = \pm aF - bF^2 \pm cF^3,$$

so daß je nach der Feldstärke Effekte erster, zweiter und höherer Ordnung auftreten können, die naturgemäß nur beobachtbar sein können, wenn die erzielten Zerlegungen groß genug sind, um die Effekte höherer Ordnung über die Fehlergrenze treten zu lassen. Dies erfordert die Anwendung möglichst hoher Feldstärken, die jetzt bis zu etwa 1,2 Mill. Volt/cm getrieben werden konnten. Erst bei Feststellung der höheren Effekte ist eine Entscheidung über die Zulässigkeit der SCHRODINGERSchen Theorie möglich.

¹ YOSHIDA, Mem Coll of Science, Kyoto 3, Nr 7, S 183 (1918)

² J ST FOSTER, Proc Roy Soc 117 (1927), Phys Rev 23, S 667 (1924), Proc Roy Soc 114, S 47 (1926), s auch J STARK, Handb der Experimentalphysik XXI Leipzig 1927

³ M KIUTI, Zf Phys 57, S 658 (1929), A WOLF, Zf Phys 61, S 619 (1930), R GRUBAUER u RAUSCH VON TRAUBENBERG, Zf Phys 62, S 289 (1930), C LANCZOS, Zf Phys 62, S 518 (1930), R LADENBURG, Phys Z 30, S 369 (1929)

Bezüglich der Intensität der verschobenen Emissionslinien ist noch die STARKsche Feststellung wichtig, nach der die Intensität der nach Rot verschobenen Linien in Richtung des Feldes kleiner ist als gegen die Feldrichtung, während umgekehrt bei den nach Violett verschobenen H-Serienlinien und denen des Para- und Ortho-Heliums die Intensität in Richtung des Feldes größer ist (Axialität der Lichtemission). Dabei ist die Intensitätsdissymmetrie für die bewegten Elektronen größer als für die ruhenden, ferner hängt sie von der Geschwindigkeit der Kanalstrahlen und somit von der Stärke des Feldes ab. Zur Begründung dieser Erscheinungen geht STARK auf die Einwirkung der Eigenschwankungen der Elektronen zurück, Frequenzänderung und Vorzeichen der Richtung einer Eigenschwankung sind zugeordnet, und der Mechanismus der Emission kann verknüpft werden mit dem richtungsmaßigen Verlauf der Eigenschwankung¹.

29 Der STARK-Effekt bei den Spektren der Elemente Untersucht worden sind in erster Linie Wasserstoff und Helium, daneben auch Stickstoff und Sauerstoff und die meisten Metalle. Für die Zerlegung der Linien der diffusen Nebenserie des Wasserstoffs gilt nach STARK

Tabelle 9 Wasserstoff (28500 Volt cm^{-1}) Beobachtung transversal

Wellenlänge	Abstand der Komponenten p	Intensität	Abstand der Komponenten s	Intensität
6563,04	+3,42	6	+0,18	8
	-3,15	3		
4861,49	+4,18	10	+2,23	8
	+0,89	1 (ungenau)	+0,89	1 (sehr klein)
	-4,01	7	-2,14	6
4340,66	+6,72	6	+4,41	4
	+1,53	1 (sehr klein)		
	-1,88	1 (sehr klein)		
	-6,23	4		
4101,85	+8,54	3	+6,27	2
	$\pm 3,56$	1	+1,90	1
	-2,80	1	-2,36	1
	-9,16	2	-6,72	1

Die Angaben zeigen, daß gegenüber der unzerlegten Linie eine schwache Rotverschiebung vorhanden ist, und daß die Zerlegung für die einzelnen Linien der Serie weder in Hinsicht auf die Komponentenabstände noch bezüglich der Intensitäten einem einfachen Gesetze genügt. Die Intensitäten der einzelnen Komponenten sind nicht konstant, sondern eine Funktion der Feldstärke, dagegen ist die Proportionalität der Abstände und der Feldstärken im ganzen untersuchten Bereich gut gewahrt² (von etwa 4000 Volt/cm bis 100000 Volt/cm).

Beim Helium liegen zwei Seriensysteme vor, die dem Orthohelium (HeI) und dem Parahelium (HeII) zugeordnet werden. Wie beim Wasserstoff ändert sich die Zerlegung von Glied zu Glied der Serien, hinzu kommt, daß beim Helium eine lineare Abhängigkeit der Abstände von der Feldstärke nicht mehr festgestellt werden konnte, teilweise erfolgt das Anwachsen der Abstände langsamer, teilweise erheblich schneller.

¹ J. STARK, Ann d Phys (5) 5, S. 607, 665, 685, 710 (1930).

² J. STARK, Ann d Phys 43, S. 965 (1914), 48, S. 193 (1915), J. STUART FOSTER, Phys Rev 1924, S. 667, Ap J 1923, S. 229, M. KIVTU, Jap J of Phys 4, S. 13 (1925), A. M. MOSHARAF, Phil Mag (6) 44, S. 371 (1922). Über Verhalten an den Seriengrenzen s. J. DEWEY, Phys Rev (2) 35, S. 1439 (1930).

Auch das Verhalten der einzelnen Serien unterscheidet sich. Bei der diffusen Hauptserie des Orthoheliums erfolgt eine Aufspaltung in unpolarisierte Komponenten, deren Zahl mit aufsteigender Gliednummer wächst, bei der scharfen Hauptserie ist eine Zerlegung in Komponenten nicht beobachtet, dagegen eine Verschiebung der einzelnen Glieder nach dem langwelligen Ende des Spektrums. Wasserstoffähnlichkeit zeigt lediglich die FOWLERSche Heliumserie, über deren Feinzerlegung jedoch noch keine Angaben vorliegen¹.

Die Abweichungen gegenüber dem Wasserstoff sind darauf zurückzuführen, daß beim Helium bereits eine merkliche Mitwirkung des inneren Feldes eintritt². Im Wasserstoffatom erhält das Elektron durch das äußere Feld eine zusätzliche potentielle Energie, und die Termänderung ist proportional der Feldstärke, bei höheren Atomen wird das Leuchtelektron durch die anderen Atomelektronen gestört, und es ergibt sich ein Termdefekt, dessen Größe von dem Verhältnis des äußeren Feldes zu der störenden Zentralkraft abhängt. Mit zunehmender Stärke des Feldes treten ebenso wie beim magnetischen Effekt Vereinfachungen auf (Analogon zum PASCHEN-BACK-Effekt).

Beim Lithium³ sind die Komponenten unsymmetrisch zur unzerlegten Linie, und zwar nach kürzeren Wellenlängen verschoben. Der Longitudinaleffekt ist dadurch ausgezeichnet, daß die bei H und He unpolarisierten Komponenten hier nach HOWELL stark polarisiert sein sollen.

Wegen der einzelnen Elemente muß auf die einschlägigen Arbeiten verwiesen werden.

Es beziehen sich auf

Wasserstoff	F. G. SLACK, Phys. Rev. (2) 35, S. 1170 (1930), K. SJÖGREN, Naturwiss. 19, S. 640 (1931), D. R. McRAC, Proc. Roy. Soc. Lond. (A) 132, S. 257 (1931), R. GLAUBAUER u. H. RAUSCH v. TRAUBENBERG, Z. f. Phys. 71, S. 291 (1931), K. SJÖGREN, Z. f. Phys. 77, S. 290 (1932), W. STEUBING, Naturwiss. 20, S. 707 (1932).
Helium	G. O. LANGSTROTH, Proc. Roy. Soc. Lond. (A) 129, S. 70 (1930), Y. ISHIDA, Scient. Papers, Inst. Phys. Chem. Res. Tokyo 14, S. 49 (1930), K. SJÖGREN, Z. f. Phys. 66, S. 377 (1930).
Sauerstoff	YOSHIDA, Mem. Coll. Science Kyoto 3, S. 291 (1919), BORICHER u. TUCZKA, Ann. d. Phys. 61, S. 107 (1920), M. KIUTI, K. OCHIAI, Y. NISHIMURA, Jap. Journ. Phys. 5, S. 139 (1929), Proc. Phys.-Math. Soc. Jap. (3) 13, S. 65 (1931).
Neon	NYQUIST, Phys. Rev. 10, S. 226 (1917), Y. ISHIDA, Naturw. 125, S. 970 (1930), N. RYDE, Z. f. Phys. 71, S. 124 (1931).
Aluminium	R. A. WETZEL, Phys. Rev. 4, S. 550 (1914), G. WENDT u. R. WETZFL, Ann. d. Phys. 50, S. 432 (1916), Y. ISHIDA u. M. FUKUSHIMA, Scient. Papers, Inst. Phys. Chem. Res. Tokyo 14, S. 123 (1930).
Argon	W. STEUBING, Phys. Z. 23, S. 427 (1922), TAKAMINE u. KOKUBU, Mem. Coll. Science Kyoto 3, S. 281 (1919), N. RYDL, Nature 129, S. 758 (1932), Z. f. Phys. 77, S. 515 (1932).
Xenon	H. W. HARKNESS u. J. F. HEARD, Phys. Rev. (2) 37, S. 1687 (1931).
Kalzium	HOWELL, l. c., TAKAMINE u. KOKUBU, Mem. Coll. Science Kyoto 3, S. 175 (1918), STARK u. KIRSCHBAUM, Ann. d. Phys. 43, S. 1031 (1919), M. RITTER, ebenda 59, S. 183 (1919).
Chrom	J. ANDERSON, Ap. J. 46, S. 104 (1917).
Eisen	TAKAMINE, Ap. J. 50, S. 23 (1919).
Kobalt, Nickel	TAKAMINE, Ap. J. 50, S. 23 (1919).
Kupfer	TAKAMINE, l. c., STARK u. HARDKE, Ann. d. Phys. 58, S. 712 (1919).
Zink	RITTER, l. c.
Molybdän	TAKAMINE, l. c.
Silber	STARK u. HARDKE, TAKAMINE, l. c.

¹ J. STARK, Ann. d. Phys. 56, S. 577 (1918), J. KOCH, ebenda 48, S. 98 (1915), G. LIEBERT, ebenda 56, S. 589 u. 610 (1918), H. NYQUIST, Phys. Rev. 10, S. 226 (1917), G. LANGSTROTH, ebenda (2) 33, S. 1084 (1929), J. STUART FOSTER, Proc. Roy. Soc. Lond. (A) 122, S. 599 (1929).

² R. LADENBURG, Phys. Z. 30, S. 369 (1929), FOSTER, J. Franklin Inst. 209, S. 585 (1930).

³ J. J. HOWELL, Ap. J. 44, S. 87 (1916), H. LÜSSEM, Ann. d. Phys. 49, S. 865 (1916).

Chlor, Brom, Jod W STEUBING, l c, L u E BLOCH u P LACROUTE, CR 193, S 232
 (1931), KWAN-ICHI-ASAGOE, Scient Pap Inst Phys Chem Res Tokyo 11,
 S 243 (1929)
 Rubidium, Zesium Y T YAO, ZfPhys 77, S 307 (1932)
 Gold TAKAMINE, l c

Anzeichen eines inversen Effektes sind bisher nur beim Natrium gefunden worden, bei Bandenspektren sind nur für Wasserstoff sichere Ergebnisse erhalten worden

Bedeutung in der Astrophysik hat der STARK-Effekt hauptsächlich deswegen, weil er eine der Ursachen ist, die für die Linienverbreiterung in Betracht kommen können. Der DOPPLER-Effekt allein genügt nicht, um die mehrfach beobachtete Abhängigkeit der Linienverbreiterung von der Laufzahl des Seriengliedes erklären zu können, und die von STARK und KIRSCHBAUM gefundene Änderung des STARK-Effektes bei den Serien von Wasserstoff, Helium und Lithium können als Beweis für den vorhandenen STARK-Effekt gelten, der auch nach einer einfachen Überlegung namentlich dann wahrscheinlich ist, wenn starke Ionisierung vorhanden ist. Auch die Art der Verbreiterung, die Verschiebung nach Rot oder Violett, deutet auf die Mitwirkung des STARK-Effektes bei der Verbreiterung, doch kann durch Schichtvorgänge in den Lichtquellen die Verschiebung ausgeschaltet werden¹. Bei den Sternen der Typen O und B 9 ist nach STRUVE die Verbreiterung durch STARK-Effekt als erwiesen zu betrachten. Ferner kann das Auftreten verbotener Linien, die im elektrischen Feld als Kombinationslinien entstehen, als Beweis dieses Einflusses angesehen werden.

Die von HUMPHREYS und MOHLER² untersuchte Druckverschiebung der Linien hat ebenfalls verschiedene Ursachen, zu denen der STARK-Effekt rechnet. Allgemein tritt eine Verschiebung nach längeren Wellen hin ein, doch werden Bandenlinien nicht betroffen. Untersuchungen von RITTER (l c, S 80, Z 9 v u) sowie von SWAIM³ zeigten, daß bei Druckverschiebung die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten dieselben sind, wie sie beim STARK-Effekt gefunden worden sind.

¹ O STRUVE, Ap J 69, S 173 (1929), s auch KIMURA u NAKAMURA, Jap J of Phys 2, S 61 (1923)

² Ap J 3, S 144 (1896) 4, S 175 (1896)

³ Ap J 40, S 137 (1914)

Kapitel 2

Das Fernrohr.

Von

ALBERT KÖNIG-Jena

Mit 138 Abbildungen

a) Die Lehre von der Abbildung durch Strahlen

1 Das Brechungsgesetz Schon im Altertum hat man aus den Erscheinungen des Schattens geschlossen, daß sich das Licht in geraden, voneinander unabhängigen Strahlen fortpflanzt. Obwohl man es nun bei der Ausbreitung des Lichtes mit Beugungserscheinungen zu tun hat und insbesondere die optische Abbildung als solche anzusehen ist, hat die große Vereinfachung, die die Strahlentheorie für die mathematische Behandlung bietet, dazu geführt, daß man zunächst die Abbildung vom Standpunkt dieser Hypothese als geometrische Optik behandelt und dann die Ergebnisse auf Grund der Beugungslehre berichtigt und ergänzt.

Werden nun Körper von den Strahlen getroffen, so wird von dem Licht ein Teil verschluckt (absorbiert), ein anderer Teil durchgelassen und ein dritter Teil zurückgeworfen (reflektiert). Ist die Oberfläche des Körpers glatt, eine Flüssig-

keitsoberfläche oder die polierte Fläche eines festen Körpers, so ist jedem einfallenden Strahl nur ein gebrochener und ein zurückgeworfener Strahl zugeordnet, in die der einfallende Strahl an der Grenzfläche des Körpers gegen das umgebende Mittel gewissermaßen aufgespalten wird. Es findet in diesem Falle regelmäßige Reflexion und Brechung statt. Indem wir von der später zu behandelnden Erscheinung der Dispersion zunächst absehen, beschränken wir uns auf das Licht einer bestimmten Wellenlänge. In diesem Fall gilt nun das folgende einfache Gesetz. Bezeichnet man (Abb 1) das im Einfallspunkt J auf dem Oberflächenelement errichtete Lot JN als Einfallslot, die durch den einfallenden Strahl und das Einfallslot bestimmte Ebene als Einfallsebene, die Winkel des einfallenden, reflektierten und gebrochenen Strahles mit dem Einfallslot als Einfallswinkel ι , Reflexionswinkel ι' und Brechungswinkel ι'' und rechnet das Vorzeichen der Winkel einheitlich, so liegen der reflektierte und der gebrochene Strahl in der Einfallsebene, und es gilt für die Brechung bzw. die Spiegelung

$$n \sin \iota'' = \sin \iota, \quad \iota' = -\iota \quad (1)$$

Ist das umgebende Mittel der leere Raum, so ist n eine den Körper kennzeichnende Größe, Brechzahl (Brechungsindex, Brechungsexponent, Brechungsquotient). Die Spiegelung kann man als Sonderfall der Brechung mit der

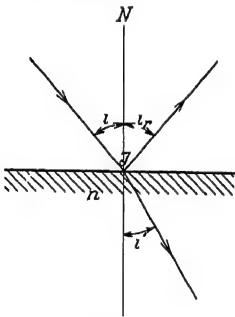


Abb 1
Zum Brechungsgesetz

Brechzahl $n = -1$ ansehen. Wird ein Strahl bei senkrechtem Einfall in sich zurückgeworfen ($i = 0$), so durchläuft er seinen Weg rückwärts, und für den Austritt aus dem Körper gilt $\sin i' = n \sin i$. Für den allgemeinen Fall des Übergangs von einem Mittel mit der Brechzahl n in ein anderes mit der Brechzahl n' gilt die Formel

$$n \sin i = n' \sin i' \quad (2)$$

Die Brechzahlen werden gewöhnlich auf Luft bezogen angegeben, da die Brechzahl der Luft bei Atmosphärendruck und einer Temperatur von 0° gemessen $n_L = 1,00029$ ist, ist mit der Brechzahl für Luft n_L zu multiplizieren, um die Brechzahl, bezogen auf den leeren Raum, zu erhalten. Die Formel (2) gilt daher auch, wenn für n und n' die auf Luft bezogenen Brechzahlen eingesetzt werden. Zu jedem Strahl in dem niedriger brechenden Mittel gibt es einen gebrochenen Strahl, die Ablenkung wächst bei zunehmendem Einfallswinkel immer schneller. Die sämtlichen einfallenden Strahlen innerhalb eines Buschels von 180° Öffnung werden in dem höher brechenden Mittel auf einen kleineren Winkel zusammengedrängt (Abb 2). Ist $n' > n$, so ist der größte Winkel i'^* durch $\sin i'^* = n/n'$ gegeben, fällt ein Strahl unter größerem Winkel i' ein, so gibt es keinen gebrochenen Strahl, sondern nur einen total reflektierten Strahl, der das ganze Licht des einfallenden Strahles mit sich führt. Den Winkel i'^* nennt man den Grenzwinkel der Totalreflexion. Er ist für Wasser ($n = 1,33$) $= 48^\circ,7$, für Glas (z. B. $n = 1,5$ bzw. $1,6$) $= 41^\circ,8$ bzw. $38^\circ,7$.

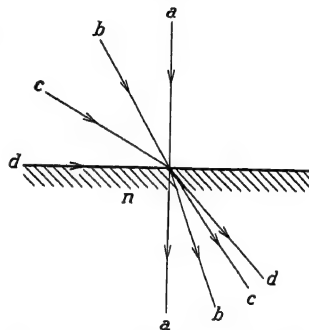


Abb 2 Die Brechung für verschiedene Einfallswinkel

Aus dem Brechungsgesetz folgen einige Hilfsätze, die in manchen Fällen von Vorteil sind. Ist z. B. ein Leitstrahl gegeben und durch diesen die Einfallsebene festgelegt, so kann man die Richtung eines weiteren Strahles durch seinen Winkel ϑ mit der Einfallsebene des Leitstrahls und dem Winkel i_p seiner Projektion in diese mit dem Einfallslot festlegen, für den Winkel ϑ gilt dann wieder das Brechungsgesetz, für den Winkel i_p aber nur, wenn man als Brechzahl statt n und n' die Brechzahlen $n \cos \vartheta$ und $n' \cos \vartheta'$ benutzt.

2 Das brechende Prisma und die Planplatte Es soll nun kurz der Durchgang des Lichtes durch ein Prisma (Abb 3), d. h. durch zwei aufeinanderfolgende und zueinander geneigte brechende Ebenen behandelt werden, wenn das erste und letzte Mittel Luft ist. Die Schnittgerade der Ebenen heißt die Prismenkante K , ihr Winkel α der brechende Winkel, die Ebene senkrecht zur Kante, die durch die Einfallslote N zum Strahl geht, der Hauptschnitt. Durch zweimalige Anwendung des Brechungsgesetzes findet man für den Durchgang eines Strahles im Hauptschnitt

$$\sin i'_2 = \sin i_1 \cos \alpha - \sin \alpha \sqrt{n^2 - \sin^2 i_1}, \quad (3)$$

die Ablenkung ist dann

$$\varepsilon = i_1 - i'_2 - \alpha \quad (4)$$

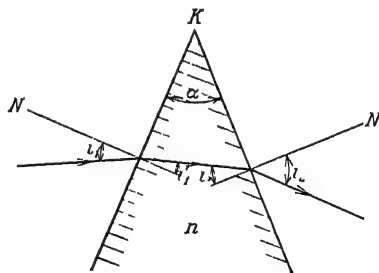


Abb 3 Der Durchgang des Lichtes durch ein Prisma

Die Winkel sind positiv, wenn man im Uhrzeigersinn drehen muß, um den Strahl in die Normale, die zweite Ebene in die erste bzw. den einfallenden in den austretenden Strahl zu bringen. Geht man von dem Fall des symmetrischen Durch-

gangs aus ($i_1 = -i'_2$, $i'_1 = -i_2$), so ist die Ablenkung dieselbe, ob man i'_1 um einen bestimmten Betrag vergrößert oder verkleinert, da in dem einen Fall der Lichtstrahl nur umgekehrt durchgeht wie in dem anderen. Da die Ablenkung nun an jeder der beiden Flächen mit dem Einfallswinkel wächst, und zwar immer schneller, so erkennt man, daß die Ablenkung bei dem symmetrischen Durchgang ein Minimum ist. Bei größerem brechendem Winkel kann an der zweiten brechenden Ebene Totalreflexion eintreten, z. B. wenn $i_1 = 0^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ und $n = 1,5$ ist. Für kleinen brechenden Winkel gilt

$$\varepsilon = \alpha \left(\frac{n \cos i'_1}{\cos i_1} - 1 \right) \quad (5)$$

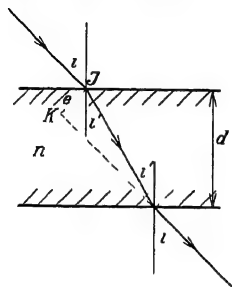


Abb 4 Der Durchgang des Lichts durch eine Planplatte

Die Ablenkung wächst also mit dem Einfallswinkel, Keilfehler von Planparallelplatten treten so bei schiefem Durchblick mehr hervor. Ist auch i_1 klein, so ist $\varepsilon = (n - 1)\alpha$. Verläuft ein Strahl geneigt zum Hauptschnitt, so ergibt sich nach dem letzten Satz von Ziff 1, daß die Ablenkung mit wachsender Neigung zunimmt, so erklärt sich die Krümmung der Spektrallinien. Beim Durchgang durch eine planparallele Platte von der Dicke d tritt keine Ablenkung ein, wohl aber eine parallele Versetzung JK (Abb 4)

$$e = \frac{d \sin(i - i')}{\cos i'} \quad (6)$$

3 Die Abbildung durch ebene Spiegel Bisher ist nur der Verlauf einzelner Strahlen bei der Spiegelung und Brechung verfolgt worden. Brechende und spiegelnde Ebenen liefern aber ein Bild der Gegenstände. Diese werden nun dadurch sichtbar, daß von ihren einzelnen Punkten Strahlenbündel ausgehen und ins Auge gelangen, deren Öffnungswinkel durch die Pupille unseres Auges bestimmt sind und die auf der Netzhaut mehr oder weniger vollkommen zu Bildpunkten vereinigt werden. Beim ebenen Spiegel sind die Verhältnisse besonders einfach. Die Strahlen eines Bündels verlaufen nach der Spiegelung so, als ob sie von einem Bildpunkt kamen, der auf dem Lot, das vom Dingpunkt auf den Spiegel gefällt wird, ebensoviel hinter dem Spiegel liegt wie der Dingpunkt davor. Da die Strahlen sich in dem Bildpunkt nicht wirklich schneiden, nennt man den Bildpunkt virtuell im Gegensatz zu reell. Die Gesamtheit der virtuellen Bildpunkte bildet nun ein zur Spiegelebene symmetrisches Abbild des Gegenstandes, von dem das Auge in der gleichen Weise Strahlen empfängt wie von einem wirklichen Gegenstand. Eine rechtsgangige Schraube wird aber als linksgangige abgebildet, man nennt daher die Abbildung ruckwendig im Gegensatz zu rechtswendig und bezeichnet die Bilder als spiegelverkehrt. Für einen Beobachter, der sowohl im Ding- wie im Bildraum entgegen der Lichtrichtung blickt, werden die zugehörigen Polarwinkel in einer zur Lichtrichtung senkrechten Ebene entgegengesetzt durchlaufen. Diese Verschiedenheit des Spiegelbildes vom Gegenstand kann sich nun noch entweder darin zeigen, daß oben und unten, oder darin, daß links und rechts vertauscht ist. Im ersten Fall spricht man von einem hohenverkehrten, im zweiten von einem seitenverkehrten Bilde. Blickt man senkrecht auf einen Spiegel, so erscheint das Bild seitenverkehrt, blickt man schrag auf einen waagrechten Spiegel, so erscheint das Bild hohenverkehrt. Dreht man den Spiegel aus der einen in die andere Lage, so findet der Übergang von seiten- zu hohenverkehrt statt, wenn der von der Mitte des Spiegels reflektierte Strahl von der Stelle kommt, die sich senkrecht über dem Beobachter befindet. Bei der unmittelbaren Beobachtung wurde man ja bis zu dieser Stelle den Blick durch Zurücklegen des Kopfes wandern lassen, dann aber erst weiter

nach einer Körperwendung um 180° . Die Beurteilung, ob das Bild seiten- oder hohenvorkehrt ist, hängt also bei horizontaler Ding- oder Bildebene von der gewohnten oder gerade eingenommenen Beobachtungsstellung ab. Man sieht in diesem Falle diejenige Gerade als eine Waagrechte an, die der Verbindungslinie der Augen parallel ist. Von diesen Ausnahmefällen der Ding- und Bildebene abgesehen, nennt man ein Bild aufrecht, wenn eine waagrechte Gerade als waagrechte und oben und unten unvertauscht wiedergegeben wird, ein aufrechtes spiegelverkehrtes Bild ist seitenverkehrt, ein umgekehrtes spiegelverkehrtes Bild hohenvorkehrt, unter aufrechtem und umgekehrtem Bild kurzweg sei ein solches verstanden, das nicht spiegelverkehrt ist. Ein spiegelverkehrtes Bild entsteht nur bei einer ungeraden Anzahl von Spiegelungen, bei einer geraden Anzahl sind Bild und Ding kongruent.

Das Bild, das durch doppelte Spiegelung entsteht, ist gegen den Gegenstand um den doppelten Spiegelwinkel, den Winkel der beiden Spiegel, um die Spiegelachse, die Schnittgrade der beiden Spiegel, gedreht, und zwar in dem Sinne, in dem man den erst getroffenen Spiegel um die Spiegelachse durch den von den Strahlen durchsetzten Raum in den zweiten dreht. Es ist nämlich die Spiegelachse offenbar ihr eigenes Bild, das Bild des ersten Spiegels liegt symmetrisch zum zweiten, ebenso wie der erste Spiegel in sein Bild wird auch der ganze Dingraum durch dieselbe Drehung in den Bildraum übergeführt werden, da Ding- und Bildraum kongruent sind. Im Gegensatz zum einfachen Spiegel hängt beim Doppelspiegel die Ablenkung nicht vom Einfallswinkel, sondern nur vom Spiegelwinkel ab, wenn sie in dem zur Spiegelachse senkrechten Hauptschnitt gemessen wird. Die Ablenkung eines Doppelspiegels ändert sich also nicht, wenn er um die Spiegelachse gedreht wird. Ein Doppelspiegel mit dem Spiegelwinkel 90° wirft alle Strahlen, die senkrecht zur Spiegelachse einfallen, parallel zur Einfallsrichtung zurück (Abb 5). Eine Gruppe von drei zueinander senkrechten Spiegeln nennt man einen Zentralspiegel¹, ein solcher wirft alle auf ihn fallende Strahlen nach Reflexion an allen drei Spiegeln parallel zur Einfallsrichtung zurück. Die Unveränderlichkeit eines Winkelspiegels und seiner Ablenkung wird bei kleinen Abmessungen dadurch gesichert, daß man ihn als Spiegelprisma aus einem Stück ausführt, da dann die elastischen Nachwirkungen und thermischen Veränderungen gering sind. Abb 6 zeigt ein Zentralspiegel- (Tripel-) Prisma.

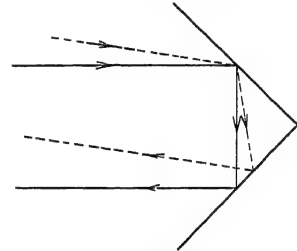


Abb 5 Die Wirkung eines 90° -Winkelspiegels

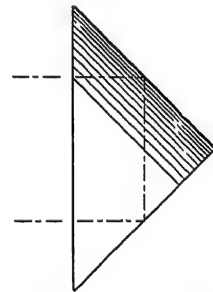


Abb 6 Ein Tripelprisma

4 Die Abbildung durch eine brechende Ebene Bei der Brechung ist die Abbildung nicht so einfach wie bei der Spiegelung. Das einzelne Auge gibt nur die Empfindung der Richtung eines Dingpunktes, seine Entfernung bleibt unbekannt, wenn man davon absieht, daß bei bekannten Gegenständen auf Grund von Schattenwirkung u dgl eine räumliche Deutung stattfindet. Der Gegenstand wird durch die Hauptstrahlen, die durch die Mitte der Augenpupille gehen, auf die Netzhaut projiziert. Bei der Brechung an einer Ebene wird nun der Bildpunkt in die Richtung verlegt, in der ein Strahl nach der Brechung verläuft, der vom Dingpunkt ausgeht und nach der Brechung die Mitte der Augenpupille

¹ BECK, Z f Instrk 7, S 380 (1887)

trifft Wird nun ein kleiner zur Visierlinie senkrechter Gegenstand einmal unmittelbar, das andere Mal bei senkrechtem Durchtritt durch eine planparallele Glasplatte betrachtet, die so dick ist, das sie den Raum zwischen Gegenstand und Auge erfüllt, so erhält man im zweiten Fall ein im Verhältnis der Brechzahl vergrößertes Bild, entsprechend wie der Winkel der Hauptstrahlen vergrößert ist, da für kleine Winkel $i' = n i$ ist. Besitzt der Gegenstand in der zur Visierlinie senkrechten Ebene größere Ausdehnung, so ist das Bild nicht in allen Teilen gleich vergrößert, da für die Brechung das Sinusgesetz gilt, die Vergrößerung aber durch das Tangensverhältnis bestimmt ist. Vielmehr, je größer eine von

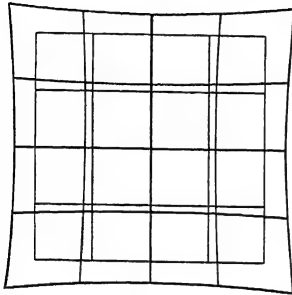


Abb 7 Die Wiedergabe eines Quadratnetzes bei Verzeichnung

der Visierlinie aus gerechnete radiale Stiecke ist, um so stärker ist die Vergrößerung, in erster Näherung wächst ihre Änderung mit der Länge der Strecke wegen der Symmetrie quadratisch. Dies hat zur Folge, daß ein Quadratnetz mit der Mitte auf der Visierlinie kissenförmig verzeichnet wiedergegeben wird (Abb 7). Man nennt diesen Bildfehler Verzeichnung und unterscheidet kissen- und tonnenförmige Verzeichnung, je nachdem, ob gerade Linien nach innen oder außen gebogen erscheinen. Diese Verbiegung einer Geraden, die nicht in einer solchen Ebene durch das Auge liegt, die zur brechenden Ebene senkrecht ist, ist nach dem S 83 angeführten Hilfssatz der Brechung ohne weiteres verständlich. Wenn nun auch das einzelne Auge die

Spitze eines dünnen, von ihm aufgenommenen Bündels nicht nach ihrer Entfernung zu erkennen vermag, so kann man doch durch Bewegen des Auges die Richtung der einzelnen Strahlen und damit ihren Schnittpunkt feststellen, ferner

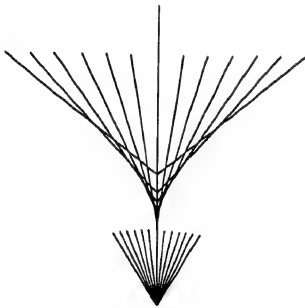


Abb 8 Die Abbildung eines Lichtpunkts durch eine brechende Ebene

liefert das beidäugige Sehen die Möglichkeit, den Schnittpunkt der beiden Hauptstrahlen festzustellen, die in die beiden Augen gelangen. In Abb 8 ist dargestellt, wie die Strahlen eines weitgeöffneten Buschels mit gemeinsamer Einfallsebene nach der Brechung an einer Ebene verlaufen. Man findet, daß die Schnittpunkte eines geneigten Strahles mit dem senkrecht einfallenden, den wir als Achse unterscheiden wollen, bei größerer Neigung sich der brechenden Ebene nähern. Die Änderung Δ der Schnittweite gegen den Grenzwert für kleine Neigungen ist bei mäßiger Neigung u' dem Quadrate von u' proportional, also $\Delta = cu'^2$, nur bei kleiner Öffnung des Bildes kann man von

einem Bildpunkt reden, dessen Abstand von der brechenden Ebene ist im Verhältnis der Brechzahl kleiner als der des Dingpunkts. Die Abweichung von der Strahlenvereinigung bei größerer Öffnung bezeichnet man als den Bildfehler der sphärischen Abweichung oder Kugelgestaltfehler, Δ als sphärische Langsabweichung, und zwar spricht man von Überverbesse- rung, wenn, wie in diesem Fall, die Schnittpunkte mit der Achse im Sinne der Licht- richtung wandern, im anderen Fall von Unterverbesserung. Fällt der Mittel- strahl nicht senkrecht auf die brechende Ebene, sondern mit der Neigung u'_1 , so wird die Schnittweite s auf diesem Mittelstrahl für die Strahlen in dessen Ein- fallsebene angenähert durch einen Ausdruck von der Form $s = a_1 + c(u'_1 - u')^2$ oder $s = a + bu' + cu'^2$ dargestellt, das Glied bu' stellt die Unsymmetrie des

Buschels nach der Brechung dar. Diesen Bildfehler bezeichnet man als Koma. Ferner ist der Bildpunkt für ein dünnes ebenes Buschel, dessen Mittelstrahl die Neigung u hat, verschieden, je nachdem das ebene Buschel in der Einfallsebene des Mittelstrahls, wie bisher, oder senkrecht dazu liegt, je nachdem wird es als tangentiales oder sagittales Buschel bezeichnet. Das sagittale Buschel kann als schmaler Teil des Strahlenkegels angesehen werden, in dem die Achse des ganzen Strahlenbündels die Achse und der um den Winkel u' geneigte Strahl die Leitlinie darstellt. Der Bildpunkt des tangentialen Buschels liegt näher an der brechenden Ebene. Diesen Bildfehler bezeichnet man als Astigmatismus und mißt ihn durch die Brennweite, den Abstand des sagittalen und tangentialen Bildpunkts. Betrachtet man den Punkt unter einer Wasseroberfläche binokular, indem man einmal die Augen in die Ebene des sagittalen, das andere Mal in die des tangentialen Buschels bringt, so wird der Bildpunkt für die beiden Fälle verschieden entfernt erscheinen, wenn man ihn mit einem an der Oberfläche gespiegelten Lichtpunkt vergleicht, dessen Bild nahe in der gleichen Entfernung und Richtung erscheint. Der Astigmatismus bei der Brechung an einer Ebene ist nur bei endlichem Bildabstand merklich. Für kleines u' gilt noch folgende Beziehung zwischen dem Astigmatismus eines Bündels und seiner sphärischen Abweichung. Während nach dem

Obigen der Bildpunkt des sagittalen Buschels in der Achse liegt, schneiden zwei benachbarte Strahlen des tangentialen Buschels (Abb 9) mit den Neigungen u' und $u' + du'$ die Achse im sagittalen Bildpunkt S und einem um $\Delta s' = 2cu' du'$ entfernten Punkte, einander aber in einem Bildpunkt T , der bei kleinem u' von dem sagittalen um $t' - s' = 2cu'^2$ entfernt ist, da ja $(t' - s') u' = \Delta s' du'$ ist. Der Astig-

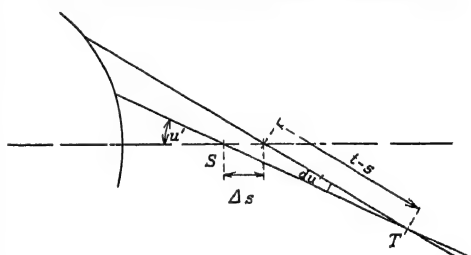


Abb 9 Die Beziehung zwischen Astigmatismus $t' - s'$ und sphärischer Abweichung $\Delta s'$

matismus tritt auch bei schiefem Durchgang des Lichtes durch eine planparallele Platte und beim Durchgang durch ein Prisma auf. Bei der Planplatte ist er unabhängig vom Bildabstand, er wächst zunächst langsam, dann immer rascher mit dem Einfallswinkel. Beim Prisma ist der Astigmatismus unabhängig vom Dingabstand, wenn das Prisma im Minimum der Ablenkung durchsetzt wird (Ziff 11), und wird Null, wenn der Strahl bei Minimalablenkung das Prisma in der brechenden Kante durchsetzt.

5 Spiegelprismen Statt der Spiegel werden in manchen Fällen Prismen mit total reflektierenden oder versilberten Reflexionsflächen verwendet. Für Glasspiegel mit Oberflächenversilberung bietet Silber den Vorteil des hohen und gleichmäßigen Reflexionsvermögens bis zu 96%. Bei Versilberung der Vorderfläche sucht man es gegen chemische Angriffe zu schützen, indem man essigsäures Blei in den Aufbewahrungsbehälter bringt, und man versucht es wohl mit einem dünnen Lacküberzug, der sehr gleichmäßig aufgetragen sein muß und beim Putzen sehr vorsichtig behandelt werden muß¹. Neuerdings ist es der Farben-I G gelungen, eine haltbare Versilberung herzustellen². Hat man es mit Parallelstrahlenbündeln zu tun, so versilbert man auf der Rückseite und schützt mit Kupfer oder Lacküberzug, zur Vermeidung von Nebenbildern müssen aber die beiden Seiten der Platte genügend parallel sein. Früher wurde, besonders auch für die Hohlspiegel der Spiegelfernrohre, sog Spiegelmetall verwendet, d. h. Legierungen

¹ PEROT, C R 149, S 725 (1909), MIETHE, A N 208, S 86 (1919)

² Dtsch R Patent 527 578 (1929)

von Cu, Sn und Zn mit etwa 65 % Reflexionsvermögen, ungefähr gleiches Reflexionsvermögen zeigen Au, Pt, Pd, die nur als galvanische Überzüge in Betracht kommen, und der Kruppsche Spiegelstahl (Abb 81). Als einfache Spiegelprismen benutzt man vorwiegend rechtwinklig gleichschenklige, bei senkrechtem Durchgang des Mittelstrahls wird ein dazu geneigter Strahl noch total reflektiert, wenn er im Glase bei $n = 1,5$ um $3^\circ,2$, in Luft also um $4^\circ,8$ gegen diesen Mittelstrahl geneigt ist, für $n = 1,6$ sind die entsprechenden Werte $6^\circ,3$ und 10° . Findet keine Totalreflexion mehr statt, so muß die Spiegelfläche des Prismas versilbert werden. Für Ein- und Austritt ist beim Prisma ($n = 1,5$) ein Reflexionsverlust von zusammen etwa 8 % anzusetzen. Ist dafür gesorgt, daß der Mittelstrahl beim Ein- und Austritt gleiche und entgegengesetzte Ablenkung erfährt, so kann man die Wirkung des Prismas in die eines einfachen Spiegels und einer Glasplatte zerlegen, die die gleiche Dicke wie der Weg des senkrecht einfallenden

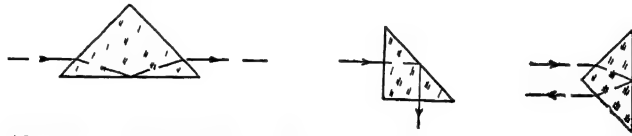


Abb 10 Die Ablenkung des Lichts durch ein Spiegelprisma

Strahles im Prisma besitzt. Es findet insbesondere eine Verlegung des Bildpunktes in Richtung des austretenden Mittelstrahls wie bei der Glasplatte statt, ferner treten dieselben Bildfehler auf, insbesondere Astigmatismus. Aus diesem Grunde darf man da, wo die Strahlenbündel nicht aus parallelen Strahlen bestehen, wie es zwischen den Linsen meist der Fall ist, nur Prismen mit senkrechtem Ein- und Austritt verwenden. Wird ein rechtwinklig gleichschenkliges Prisma wie beim Prismenkreis für wechselnde Ablenkung benutzt (Abb 10), indem man es um eine Senkrechte zum Hauptschnitt dreht, so unterscheidet es sich von einem einfachen Spiegel dadurch, daß bei senkrechter Stellung der



Abb 11 Das Umkehrprisma nach DELABORNE

Spiegelfläche zum einfallenden Strahl der Strahl parallel versetzt in die entgegengesetzte Richtung zurückgeworfen wird, und daß es auch bei paralleler Stellung noch benutzt werden kann, während der einfache Spiegel hier infolge streifenden Eintritts nicht mehr zu brauchen ist, in diesem Fall wird von dem Prisma noch ein Parallelstrahlenbündel von einem Drittel der Breite wie bei senkrechtem Durchtritt unter Reflexion durchgelassen. Bei Benutzung in dieser Stellung bezeichnet man das Prisma als Wende- (Reversions-) Prisma nach AMICI¹. Dreht man es nämlich um die Visierlinie, so bleibt der Mittelstrahl unabgelenkt, aber das Bild wird gedreht, und zwar wegen der Symmetrie zur Spiegelebene um den doppelten Drehwinkel. Schaltet man nun nach DELABORNE² zwei solche Wendeprismen hintereinander, so wird das Bild vollständig (in Seite und Höhe) umgekehrt (Abb 11). Auf andere bildumkehrende Prismen wird in Ziff 49 eingegangen.

6 Einleitendes über die Abbildung durch Umdrehungsflächen. Wir haben oben gesehen, daß die Abbildung durch eine brechende Ebene unvollkommen ist

¹ Ann de Chim et de Phys 22, S 137 (1823)

² Franz Patent S 5941 (1838)

Neben brechenden und spiegelnden Ebenen kommen nun weiter bei optischen Geräten Umdrehungsflächen, insbesondere Kugelflächen, in Betracht. Bei der Kugelfläche werden die von einem Punkt ausgehenden Strahlen auch bei großen Neigungsunterschieden nur dann wieder streng in einem Bildpunkt vereinigt, wenn der Dingpunkt auf der Kugelfläche, in ihrem Mittelpunkt oder auf einer zur brechenden konzentrischen Kugelfläche mit einem Halbmesser $n'r$ liegt. Bei dieser aplanatischen Brechung hat die konzentrische Bildfläche den Halbmesser $n'r$ n' , wenn die Länge der Strahlen von der brechenden Fläche bis zu ihrem Schnittpunkt mit der Achse, der Geraden durch Kugelmittle und Dingpunkt, mit p für den Dingraum und mit p' für den Bildraum bezeichnet wird, so gilt $n'p' = np$, ferner ist die Neigung u des Dingstrahls gegen die Achse gleich dem Brechungswinkel i' , es kommt nur der Dingpunkt auf der hohlen Seite des brechenden Teils der Kugelfläche in Betracht. Bei einem System von Kugelflächen ist im allgemeinen die Achse, die Gerade durch Einfallspunkt und Kugelmittle, gemeinsam, bzw. liegen die Mittelpunkte der Kugelflächen auf einer Geraden, ein solches System nennt man ausgerichtet (zentriert). Da mit solchen Flächen meist keine genügende Abbildung zu erreichen ist, ist es die Aufgabe der rechnenden Optik, die Zusammensetzung des Systems so zu bestimmen, daß die Bildfehler der einzelnen Flächen sich möglichst gegenseitig ausgleichen. Um die Abbildungsgrößen und die Bildfehler festzustellen, kann man einzelne ausgewählte Strahlen durch das System rechnerisch verfolgen, auf die Wiedergabe der betreffenden Formeln soll hier verzichtet werden. Ein anderer Weg besteht darin, daß man zunächst die Abbildung unter Beschränkung auf dünne Bündel untersucht und dann die Bildfehler durch Näherungsausdrücke darstellt. Die Abbildung innerhalb eines dünnen fadenförmigen Raums in der Achse, also unter der Annahme, daß die Neigung der Strahlen gegen die Achse unendlich klein ist, wird nach GAUSS¹ benannt. Es soll nun zunächst die Theorie dieser Abbildung gegeben werden, und zwar in Erweiterung auf den allgemeinen Fall, daß die Brechung des Leitstrahls, mit dem die übrigen Strahlen nur kleine Winkel bilden, unter endlichem Einfallswinkel erfolgt. Die abzuleitenden Abbildungsgesetze gelten nicht nur für die Brechung an einem Element einer Kugelfläche, sondern auch an einem doppelt gekrümmten Element, allerdings müssen bei mehreren aufeinanderfolgenden Elementen die Hauptschnitte zusammenfallen, die Gesetze gelten also auch für die Abbildung durch Zylinderlinsen und Prismen. Es sollen ferner die Grundgesetze dieser Abbildung sogleich für den Fall eines Systems von vielen Flächen abgeleitet werden und erst dann ausgewählte, einfache Systeme behandelt werden.

7 Der Begriff des Bildpunkts Bei der Lochkamera entsteht das Bild dadurch, daß jedem Lichtpunkt im Dingraum ein Beugungsscheibchen entspricht, das die Öffnung in der Vorderwand auf dem Schirm erzeugt. Statt eines scharfen Bildpunkts hat man so nur einen unscharfen Bildfleck. Aus genügender Entfernung erscheinen aber die Bildflecke als scharfe Bildpunkte, und zwar dort, wo die Mitte des Beugungsscheibchens ist. Das Bild ist eine Zentralprojektion durch die Blendenmitte. Hat man nun ein Linsensystem mit enger Blende, so kann man ebenfalls das Bild als eine Projektion durch die Blendenmitte ansehen, wenn man von unsymmetrischer Helligkeitsverteilung in den einzelnen Bildflecken absieht. Man hat aber die Biegung der Strahlen zu berücksichtigen. Die projizierenden Strahlen, Hauptstrahlen genannt, sind bei dieser optischen Projektion die Strahlen im Bildraum, die durch die Linse zwischen Blende und Bild den durch die Blendenmitte gegangenen Strahlen zu-

¹ Gott Abh. 1 S. 1 (1838—1841), Ann. Chim. Phys. 33 S. 259 (1851), s. ferner ABEL in CZAPSKI-EPPENSTEIN, Theorie d. optischen Instrumente 3. Aufl. Leipzig Barth 1924, GULLSTRAND in HELMHOLTZ, Handbuch d. Physiologischen Optik, 3. Aufl. Leipzig Voss 1909.

geordnet sind, deren weiteren Verlauf darstellen (Ziff 24) Infolge der Brechung der Strahlen kann dies Bild Verzeichnung (Ziff 4) aufweisen Erweitert man die Öffnung, so ändert sich die Größe des Bildflecks mit dem Abstand des Auffangschirms von der Linse starker Den Bildpunkt wird man vom Standpunkt der geometrischen Optik da suchen, wo das Strahlenbündel am meisten eingeschmurt ist Für die Ableitung der Abbildungsgesetze wollen wir als Ort des Bildpunkts die Stelle ansehen, wo der Hauptstrahl von einem unendlich benachbarten geschnitten wird Handelt es sich um die Abbildung eines kleinen Flächenstückes senkrecht zum Hauptstrahl auf einem zum Bildhauptstrahl senkrechten Auffangschirm, so soll die Lage des Schirms durch den Ort des Bildpunkts auf dem der Mitte des Flächenstücks entsprechenden Hauptstrahl bestimmt sein Die Bildpunkte außer der Mitte sind dann im allgemeinen durch reine optische Projektion bestimmt Das Verhältnis einer unendlich kleinen Strecke auf dem Auffangschirm zu der entsprechenden des Gegenstandes nennt man die Quer- (Lateral-) Vergrößerung Das Verhältnis des unendlich kleinen Winkels der in dem mittleren Bildpunkt zusammentreffenden und ihn erzeugenden Strahlen zu dem Winkel der entsprechenden Strahlen im Dingraum, kurz, das Verhältnis der zugeordneten Öffnungswinkel im Ding- und Bildraum, nennt man das Konvergenzverhältnis oder die Winkel- (Angular-) Vergrößerung Wir wollen nun zunächst eine wichtige einfache Beziehung zwischen diesen beiden Vergrößerungen ableiten und dann zeigen, wie aus ihr die Gesetze der Abbildung folgen, die die Beziehung zwischen Größe und Lage von Ding und Bild angeben Das die Abbildung vermittelnde System bestimmt nur die Größe der in den Abbildungsgesetzen auftretenden Konstanten, auf deren Berechnung aus den Radien, Abständen und Brechzahlen des Systems erst zuletzt eingegangen wird Für die strengere Behandlung der Abbildungslehre wie auch der Bildfehler sei auf die Arbeiten von GULLSTRAND¹ verwiesen sowie auf die zusammenfassenden Werke von BOEGEHOLD² und HERZBERGER³

Eine seiner Zeit weit vorausseilende Erkenntnis der hier bestehenden Zusammenhänge besaß HAMILTON⁴, dessen Abhandlungen aus den Jahren 1827 bis 1841 mit Ergänzungen aus dem Nachlaß jetzt gesammelt vorliegen, aber auch die veröffentlichten haben erst in neuerer Zeit die gebührende Beachtung gefunden

Es sei noch bemerkt, daß im folgenden Strecken parallel der Achse im Sinne der Lichtrichtung, Strecken senkrecht zur Achse nach oben positiv gerechnet werden, und daß die Neigungswinkel des Strahles gegen die Achse positiv sind wenn der Strahl durch eine Drehung entgegengesetzt der des Uhrzeigers in die Achse gedreht wird

8 Der Satz von HELMHOLTZ In Abb 12 sei OJ der einfallende Strahl, K, J ein Bogenelement der brechenden Umdrehungsfläche in der Einfallsebene, die mit einem Krümmungshauptschnitt zusammenfällt, JO' der gebrochene Strahl Ein zweiter, von O ausgehender unendlich benachbarter Strahl OK_i werde nach O' gebrochen, wir bezeichnen daher O' als den tangentialen Bildpunkt von O und nennen O' und O zugeordnete (konjugierte) Punkte M_i sei ein O unendlich benachbarter Punkt in der zum Leitstrahl OJ senkrechten Ebene durch O und liege in der Einfallsebene Denken wir uns nun eine enge Blende

¹ Skand Arch Physiol 2, S 269 (1890), Nova Acta Reg Soc Sc Upsala 3 (1900), Ann d Phys 18, S 941 (1905), Svenska Vet Akad Handl 41, S 1 (1906), 55, S 1 (1915), 63, Nr 13 (1924)

² Ergebnisse d exakten Naturwissenschaften 8, S 69 (1929)

³ Strahlenoptik, Bd 35 der Grundlehren der mathematischen Wissenschaft in Einzeldarstellungen Berlin Julius Springer 1931

⁴ Math Papers I Cambridge Univ Press 1931

in P auf dem Strahl OJ und in O'_i eine zum Leitstrahl senkrechte Auffangebene, so wird man als Bildpunkt von M_i den Punkt M'_i ansehen, wo der zu M_iP gehörige gebrochene Strahl die Auffangebene trifft, den Leitstrahl trifft er in dem Bildpunkt P'_i von P .

Da über den Abstand des Punktes K_i von J nichts weiter vorausgesetzt ist, als daß er unendlich klein ist, können wir K_i auch auf dem Strahl M_iP annehmen. Die Winkel OK_iM_i und $O'_iK_iM'_i$ sind nun zusammengehörige Änderungen di ferner di' des Einfallswinkels. Aus dem Brechungsgesetz folgt

$$\frac{di'}{di} = \frac{n \cos i}{n' \cos i'} \quad (7)$$

Bezeichnet man OM_i mit dy_i und OK_i , genähert gleich OJ , mit s , ferner $O'_iM'_i$ mit dy'_i sowie O'_iK_i , genähert gleich O'_iJ , mit s'_i , so gilt nach (7)

$$\frac{s \, dy'_i}{s'_i \, dy_i} = \frac{n \cos i}{n' \cos i'} \quad (8)$$

Indem man den Bogen JK_i das eine Mal durch du_i , d. h. den Öffnungswinkel JOK_i und s , das andere Mal durch $du'_i = JO'_iK_i$ und s'_i ausdrückt, erhält man weiter die Beziehung

$$\frac{s \, du_i}{\cos i} = \frac{s'_i \, du'_i}{\cos i'} \quad (9)$$

Aus (8) und (9) ergibt sich der Satz von HELMHOLTZ¹ für die Tangentialebene

$$n' \, dy'_i \, du'_i = n \, dy_i \, du_i \quad (10)$$

Führt man die Quer- (Lateral-) Vergrößerung $\beta_i = dy'_i / dy_i$ und die Winkelvergrößerung (das Konvergenzverhältnis) $\gamma_i = du'_i / du_i$ ein, so kann man auch schreiben

$$\beta_i \gamma_i = \frac{n}{n'} \quad (11)$$

Betrachtet man ein zu der Einfallsebene senkrechtes, dünnes ebenes Buschel und ist C , der Krümmungsmittelpunkt der Fläche in dem Schnitt dieses Buschels, so kann der dem Leitstrahl benachbarte Strahl OK , in diesem Schnitt durch einen ebensolchen Strahl ersetzt werden, der auf einem Kegel mit C, O als Achse und JO als Leitlinie liegt, das Entsprechende gilt für K_i, O'_i , der sagittale Bildpunkt O'_i liegt im Schnittpunkt von JO'_i und OC . Nach dem Hilfsatz am Ende von Ziff 1 gilt für die Winkel der benachbarten Strahlen M, K, O und M', K', O' mit dem leitenden

$$n \, di = n' \, di', \quad \text{oder} \quad \frac{n \, dy_i}{s} = \frac{n' \, dy'_i}{s'_i}, \quad (12)$$

wo dy_i bzw. dy'_i die Strecke OM , bzw. $O'M'$ ist und s bzw. s'_i die Schnittweite OJ bzw. O'_iJ , ferner ist hier

$$s \, du_i = s'_i \, du'_i, \quad (13)$$

wo du_i und du'_i die Öffnungswinkel JOK und JO'_iK' sind. Es ergibt sich also auch hier die Gleichung (10) für die entsprechenden Größen der sagittalen Abbildung. Für die anschließenden Folgerungen aus dem Satz können die Zeichen s und i fortgelassen werden. Fällt der Strahl OJ senkrecht auf eine Kugelfläche oder den Scheitel einer Umdrehungsfläche, so gilt der Satz für jeden Schnitt durch OJ . Der Satz gilt ohne weiteres für ein vielfachiges System, da $P_k = P'_{k-1}$,

¹ Handbuch der Physiologischen Optik, 1. Aufl. Leipzig Voss 1867, Vorläuter sind HUYGENS, SMITH, LAGRANGE

$du_k = du'_{k-1}$, $dy_k = dy'_{k-1}$ ist, wenn bei allen Flächen der eine Hauptkrümmungsschnitt in die Einfallsebene fällt und jede Einfallsebene mit der folgenden den Winkel 0° oder 90° bildet

9 Die Grundgleichungen der Abbildung Es seien zu zwei Dingpunkten O_1 und O_2 auf dem Leitstrahl die durch ein solches System zugeordneten Bildpunkte O'_1 und O'_2 gegeben. Dann kann man den Abstand O_1O_2 gleich A durch dy_2 und du_1 ausdrücken, wo du_1 der Öffnungswinkel in O_1 und dy_2 der Abstand der Schenkel von du_1 in O_2 ist. Das Entsprechende gilt für $A' = O'_1O'_2$. Man erhält so

$$\frac{A'}{A} = \frac{dy'_2}{du'_1} \frac{du_1}{dy_2} \quad (14)$$

und mit Hilfe von (10) und (11)

$$\frac{A'}{n'} \frac{n}{A} = \beta_2 \beta_1 \quad (15)$$

Wenn man nun O auf der Geraden OJ von O_0 aus wandern läßt und einen von O ausgehenden Strahl immer durch einen bestimmten außersaxialen Punkt Q der Blende bei P gehen läßt, so ändert sich die Neigung du dieses Strahls gegen den Leitstrahl von dem Wert du_0 ausgehend. Die entsprechenden Bildstrahlen gehen in erster Näherung durch einen Punkt Q' , den Öffnungswinkel du entsprechen im Bildraum solche du' und dem Winkel $QOQ_0 = du - du_0$ im Bildraum Winkel $du'_k - du_{0,k}$, die im festen Verhältnis γ_p zu $du - du_0$ stehen. Es ergibt sich also

$$\gamma = \frac{du'_k}{du} = \frac{du_{0,k} + du'_1 - du_{0,1}}{du_0 + du - du_0} = \frac{du_{0,1} + \gamma_p(du - du_0)}{du_0 + du - du_0} \quad (16)$$

Der Differentialquotient von γ nach $du - du_0$ ändert sein Vorzeichen mit $du - du_0$ nicht. Es ändert sich also γ und damit auch β mit dem Dingabstand immer in demselben Sinne. Wenn man O über ∞ bis in die Anfangsstellung wandern läßt, hat auch β alle möglichen Werte angenommen, ausgenommen ist nur der Fall, auf den in Ziff 11 eingegangen wird, wo $du_{0,1} = \gamma_p du_0$, wo γ für alle Lagen von O einen festen Wert hat. Ausgezeichnete Werte sind $\beta = +1$ und $\beta = -1$. Man bezeichnet nun die zugeordneten, d. h. als Ding- und Bildpunkt zusammengehörigen Punkte H und H' für $\beta = -1$ als negative Hauptpunkte, für $\beta = +1$ als positive Hauptpunkte, diese auch kurzweg als Hauptpunkte. Ist die Vergrößerung in zwei anderen zugeordneten Punkten β und bezeichnet man den Abstand des negativen vom positiven Hauptpunkt im Ding- bzw. Bildraum mit m bzw. m' , die Abstände der zugeordneten Punkte mit der Vergrößerung β von denselben Anfangspunkten mit a und a' , so ist nach (15)

$$\frac{a'}{n'} \frac{n}{a} = \beta, \quad \frac{a' - m'}{n'} \frac{n}{a - m} = -\beta, \quad \frac{m'}{n'} \frac{n}{m} = -1 \quad (17)$$

Daraus folgt

$$\frac{n'}{a'} - \frac{n}{a} = -\frac{2n}{m} = \frac{2n'}{m'} \quad (18)$$

Aus (14) und (17) folgt für die Winkelvergrößerung γ und weiter aus (15) für die Tiefen- (Axial-) Vergrößerung $da' da = \alpha$, d. h. das Verhältnis kleiner Achsenstrecken in den zugeordneten Punkten,

$$\gamma = \frac{a}{a'}, \quad \alpha = \frac{n'}{n} \frac{a'^2}{a^2}, \quad (19)$$

und es gilt weiter

$$\alpha = \frac{n'}{n} \beta^2, \quad \alpha \gamma = \beta \quad (20)$$

Aus Gleichung (18) folgt, daß der zu $a' = \infty$ gehörige Dingpunkt mitten zwischen dem dingseitigen positiven und negativen Hauptpunkt liegt, er wird der dingseitige oder vordere Brennpunkt genannt, ebenso liegt der zu $a = \infty$ ge-

horige bildseitige oder hintere Brennpunkt mitten zwischen den bildseitigen Hauptpunkten — m 2 n setzen wir $=f$ und bezeichnen diese Größe als die Brennweite. Vielfach wird auch abweichend davon m 2 und m' 2 als vordere und hintere Brennweite eingeführt. Es gilt also

$$\frac{n'}{a'} - \frac{n}{a} = \frac{1}{f} \quad (21)$$

Diese Gleichung und die erste von (17) sind die Grundgleichungen der Abbildung, mit deren Hilfe Lage und Größe des Bildes eines Gegenstandes gefunden werden können. Der Abstand des ding- bzw bildseitigen Brennpunktes von dem betreffenden positiven Hauptpunkt ist also $-nf$ bzw $n'f$. Den Kehrwert φ der Brennweite nennt man die Stärke, sie wird in Dioptrien gemessen, deren Einheit die Linse von einem Meter Brennweite darstellt. Statt auf die Hauptpunkte können die Grundgleichungen der Abbildung auch auf beliebige andere zugeordnete Punkte bezogen werden, wobei jedoch die Vergrößerung in diesen Bezugspunkten, den Grundpunkten, bekannt sein muß. Bezeichnet man die Abstände der neuen Grundpunkte mit a_p und a'_p , die Abstände des Ding- und Bildpunkts von diesen neuen Grundpunkten mit a^* und a'^* , die Vergrößerung in den neuen Grundpunkten mit β_p , so ergibt sich aus der ersten Formel (17), da $a^* = a - a_p$ und $a'^* = a' - a'_p$ ist,

$$\beta = \frac{n}{a^*} \frac{a'^*}{n'} \frac{1}{\beta_p} \quad (22)$$

Es ergibt sich weiter aus

$$1 - \beta = \frac{a'}{n'f}, \quad 1 - \beta_p = \frac{a'_p}{n'f}, \quad \beta_p - \beta = \frac{a'^*}{n'f} \quad (23)$$

im Verein mit (22) nach Umformung

$$\frac{n' \beta_p^2}{a'^*} - \frac{n}{a^*} = \frac{\beta_p}{f} \quad (24)$$

Vielfach werden die Grundgleichungen, bezogen auf die Brennpunkte, benutzt, die nur ausgezeichnete, aber nicht zugeordnete Punkte sind. Sind die Abstände gerechnet von den Brennpunkten ξ und ξ' und ersetzt man a durch $\xi - nf$ und a' durch $\xi' + n'f$, so erhält man

$$\xi \xi' = -n n' f^2, \quad (25)$$

$$\beta = -\frac{\xi'}{n'f} = \frac{nf}{\xi}, \quad \gamma = -\frac{nf}{\xi'} = \frac{\xi}{n'f} \quad (26)$$

Um die Brennweiten für die Kugelfläche bei endlichem Einfallswinkel des Lichtstrahls durch Radius r und Brechzahlen auszudrücken, benutzen wir den S. 89 erwähnten Fall der aplanatischen Brechung. Da im Einfallspunkt Ding- und Bildpunkt zusammenfallen, müssen die Gleichungen (22) und (24) auch für die Abstände eines aplanatischen Punktepaars von diesem Einfallspunkt gelten. Im Einfallspunkt ist offenbar für den sagittalen Schnitt $\beta_p = 1$, für den tangentialen $\beta_p =$ dem Verhältnis der Querschnitte eines Parallelstrahlenbuschels vor und nach der Brechung $\cos i' / \cos i$, ferner sind die Schnittweiten $p = r(\sin i + i')$ $\sin i'$ und $p' = r \sin(i + i') \sin i$. Setzt man diese Schnittweiten und β_p in (24) ein, so erhält man

$$\frac{1}{f_s} = \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r}, \quad \frac{1}{f_t} = \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r \cos i \cos i'} \quad (27)$$

Mit Benutzung dieser Brennweiten erhält man nun für beliebige auf den Einfallspunkt bezogene Schnittweiten s, s' und t, t'

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r}, \quad \frac{n' \cos^2 i'}{t'} - \frac{n \cos^2 i}{t} = \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r} \quad (28)$$

Bei der brechenden Kugelfläche gilt für die auf den Scheitel bezogenen Schnittweiten s und s' des achsennahen Raumes ($z = 0$)

$$\frac{n'}{s} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r} \quad (29)$$

und für die auf den Kugelmittelpunkt bezogenen $c = s - r$ und $c' = s' - r$

$$\frac{1}{n'c'} - \frac{1}{nc} = -\frac{1}{r} \left(\frac{1}{n'} - \frac{1}{n} \right) \quad (30)$$

Die Abbildungsgleichungen gelten beim ausgerichteten System von Umdrehungsflächen strenggenommen nur für kleine Neigungswinkel der Strahlen, d. h. für den fadenförmigen Raum um die Achse, bei einem Leitstrahl, der geneigt zur Achse im Hauptschnitt verläuft, gelten sie nur je in den beiden Hauptkrümmungsschnitten für einen schmalen Bereich um den Leitstrahl. Wo nichts anderes bemerkt ist, beschränken wir uns im folgenden auf den ersten Fall der achsennahen Strahlen. Obwohl die Strahlen nur kleine Neigungen haben, kann man ihren Gang geometrisch veranschaulichen, indem man die Abmessungen quer zur Achse so stark überhoht darstellt, daß sie endliche Weite annehmen, die Abbildungsgleichungen bleiben so gültig. In dieser Darstellung werden die von einem Dingpunkt ausgehenden Strahlen streng in einem Bildpunkt vereinigt. Achsen senkrechte Ebenen entsprechen hier wieder achsen senkrechten Ebenen, in der Tat findet auch für die Punkte außer der Achse eine genäherte Abbildung statt, da sich die Gleichungen für die Bildgröße als unabhängig von der Lage des Kreuzungspunktes der Hauptstrahlen ergeben haben. Die achsen senkrechten Ebenen in den ausgezeichneten Punkten bezeichnet man entsprechend diesen Punkten, z. B. die in den Brennpunkten als Brennebenen, die in den Hauptpunkten als Hauptebenen. Als positive bzw. negative Knotenpunkte bezeichnet man die zugeordneten Punkte, für die der durchgehende Dingstrahl die gleiche Neigung gegen die Achse hat wie der zugehörige Bildstrahl, d. h. in denen die Winkelvergrößerung $= 1$ bzw. -1 ist, also $\beta = n' n'$ bzw. $-n' n'$ ist. Durch Anwendung von (17) und (21) ergibt sich, daß für die positiven Knotenpunkte $a'_k = a_k = f(n' - n)$ ist. Wenn nichts anderes bemerkt, sind im folgenden immer die positiven Haupt- und Knotenpunkte gemeint. Bei der einfachen brechenden Fläche fallen je die Hauptpunkte H und H' und die Knotenpunkte K und K' zusammen, und zwar die Hauptpunkte in dem Flächenscheitel, die Knotenpunkte in dem Krümmungsmittelpunkt, es ist also $f = r(n' - n)$, und der Abstand des bild- bzw. dingseitigen Brennpunktes ist $n'r(n' - n)$ bzw. $-nr(n' - n)$. Als Beispiel diene noch das Auge in Akkommodationsruhe, seine Brennweite ist 17,06 mm, die Abstände der ausgezeichneten Punkte von dem Scheitel S der Hornhaut sind $SH = 1,35$, $SH' = 1,60$, $SF = -15,71$, $SF' = 24,39$, $SK = 7,08$, $SK' = 7,33$. Dieser Fall wie der einer einfachen sammelnden Fläche entsprechen einem positiven f , bei negativem f kehrt sich die Lage der ausgezeichneten Punkte zueinander um. Für $n = n'$ ist $a'_k = a_k = 0$, jeder Knotenpunkt fällt mit dem betreffenden Hauptpunkt zusammen, und $HH' = H'F'$. Abb. 13 zeigt, wie man Bildlage und Größe bei gegebenen Haupt- und Brennebenen auf Grund von deren Bedeutung durch Zeichnen ermitteln kann. Die Strahlen durch den vorderen Brennpunkt F verlaufen im Bildraum parallel zur Achse FF' in einem Abstand $H'M' = HM$. Zu dem Dingstrahl O_1O_2 parallel der Achse ist der Bildstrahl durch den Brennpunkt F' und durch den Punkt N' festgelegt, wo $N'H' = NH$ ist. Da die Hauptpunkte hier zugleich Knotenpunkte sind, kann man zur Nachprüfung zu den Strahlen O_1H und O_2H noch die parallelen $H'O'_1$ und $H'O'_2$ ziehen.

Die Brennweite wird meist anders definiert, als wie es sich hier bei der Ableitung der Abbildungsgesetze ergab. Diese Definitionen, die für die Messung der Brennweite Bedeutung haben, sollen nun aus den Formeln (26) für β und γ abgeleitet werden. Laßt man nämlich in dem Ausdruck für β den Abstand z bzw. z' unendlich groß werden und beachtet, daß $\beta = y'/y$ ist, so kann man die kleine Neigung des parallelen Strahlenbündels $w = -y/z$ und $w' = -y'/z'$ setzen, und es ergibt sich so

$$f = -\frac{y'}{nw} = \frac{y}{n'w'} \quad (31)$$

Führt man in denselben Grenzfällen in dem Ausdruck für γ die Einfallshöhe eines zur Achse parallelen Strahles $h = zu$ bzw. $h' = z'u'$ ein und beachtet, daß $\gamma = u'/u$ ist, so ergibt sich

$$f = \frac{h}{n'u'} = \frac{h'}{nu} \quad (32)$$

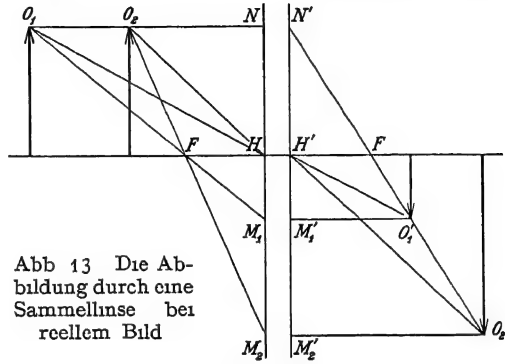


Abb 13 Die Abbildung durch eine Sammellinse bei reellem Bild

Für $n = n' = 1$ ist also die Brennweite nach der ersten Formel gleich dem Verhältnis der Bildgröße in der hinteren Brennebene zur Winkelgröße des Gegenstandes in unendlicher Entfernung bzw. gleich der Dinggröße in der vorderen Brennebene zur Winkelgröße des zugehörigen Bildes. Nach der zweiten Formel ist die Brennweite gleich dem Verhältnis der Einfallshöhe eines parallel zur Achse einfallenden Strahles zur Neigung des zugehörigen Bildstrahls bzw. gleich der Austrittshöhe eines parallel zur Achse im Bildraum verlaufenden Strahles zur Neigung des zugehörigen Bildstrahls, hiernach bezeichnet man ein System mit positiver Brennweite als sammelnd, mit negativer als zerstreuend.

10 Sonderfalle von abbildenden Systemen Für die weitere Untersuchung beschränken wir uns auf Systeme, in denen das erste und letzte Mittel Luft ist, also $n_1 = n'_1 = 1$. Es verschwinden nun n und n' aus den oben gegebenen Formeln, die Haupt- und Knotenpunkte fallen zusammen. Für die Zusammensetzung eines Systems aus zwei Teilsystemen mit beliebig vielen Flächen mit den Brennweiten f_1 und f_2 , wenn das erste und letzte Mittel die Brechzahl 1 hat, sei der Abstand des dingseitigen Hauptpunktes des zweiten Systems vom bildseitigen des ersten $= A$, die Brechzahl des Mittels zwischen den Teilsystemen n , dann ist das Verhältnis der Einfallshöhe eines parallel zur Achse in das erste System eintretenden Strahles in der bildseitigen Hauptebene dieses Systems zu der Einfallshöhe h_2 in der dingseitigen Hauptebene des zweiten Systems $h_1/h_2 = a'_1/a_2 = 1/(1 - A/n_1)$. Der Abstand a'_k des Brennpunktes des ganzen Systems vom dem bildseitigen Hauptpunkt des zweiten Systems ist nach (21)

$$\frac{1}{a'_p} = \frac{h_1}{h_2} \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (33)$$

Für die Brennweite des gesamten Systems f gilt

$$f = \frac{h_1}{h_2} a'_k = -\frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - \frac{A}{n}} \quad (34)$$

Der Abstand des vorderen Brennpunktes vom dingseitigen Hauptpunkt des ersten Teilsystems ergibt sich entsprechend aus dem umgekehrten Strahlengang. Für die dicke Linse in Luft mit den Radien r_1 und r_2 (r ist positiv, wenn die Kugelfläche dem einfallenden Licht die erhabene Seite zukehrt), deren Kehr-

werte, die Krümmungen, mit ϱ_1 und ϱ_2 bezeichnet werden sollen, der Dicke d und der Brechzahl n ergibt sich daraus für die Starke

$$\varphi = (n-1)(\varrho_1 - \varrho_2) + \frac{(n-1)^2}{n} d \varrho_1 \varrho_2 \quad (35)$$

Führt man die Abkürzung $R = n(r_2 - r_1) + (n-1)d$ ein, so ergibt sich für die Brennweite f , den Abstand s_F des vorderen Brennpunktes von der Vorderfläche und den Abstand s'_H des hinteren von der Hinterfläche

$$f = \frac{n r_1 r_2}{(n-1)R}, \quad s_F = -\frac{r_1(n r_1 + R)}{(n-1)R}, \quad s'_H = \frac{r_2(n r_2 - R)}{(n-1)R} \quad (36)$$

Für die Hauptpunktabstände s_H und s'_H von den Linsenscheiteln gilt

$$s_H = -\frac{r_1 d}{R}, \quad s'_H = -\frac{r_2 d}{R} \quad (37)$$

Für den Abstand der Hauptpunkte voneinander gilt, wenn d klein gegen $r_2 - r_1$ ist, $z = (n-1)d/n$, für die dünne Linse gilt ($d=0$)

$$\varphi = (n-1)(\varrho_1 - \varrho_2) \quad (38)$$

Für eine Folge von dünnen, sich berührenden Linsen gilt für die Gesamtstarke $\Phi = \sum \varphi_v$. Bei der dünnen Linse wie beim dünnen Linsensystem fallen die Hauptpunkte zusammen und in den gemeinsamen Linsenscheitel. Der Abstand des Brennpunktes davon ist gleich der Brennweite. Für zwei dünne Linsen im Abstand A gilt

$$\Phi = \varphi_1 + \varphi_2 - A \varphi_1 \varphi_2 \quad (39)$$

Für den Kugelspiegel ist $f = -r/2$, d. h. der Brennpunkt liegt mitten zwischen Scheitel und Krümmungsmittelpunkt, der Hohlspiegel wirkt also wie eine Sammellinse, der erhabene Spiegel wie eine Zerstreuungslinse, wenn man

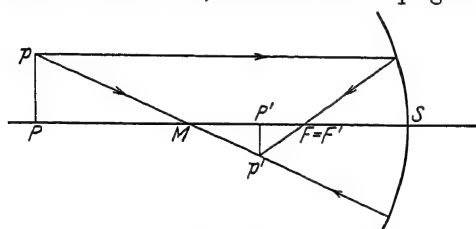


Abb 14 Die Abbildung durch einen Hohlspiegel bei reellem Bild

nur beachtet, daß im Ding- wie im Bildraum das Vorzeichen von Strecken auf der Achse jeweils in der Lichtrichtung positiv ist, die aber für Ding und Bild verschieden ist. Abb 14 zeigt, wie für einen Hohlspiegel S mit dem Kugelmittelpunkt M und dem Brennpunkt $F = F'$ zu einem Ding Pp das Bild $P'p'$ gefunden wird, indem man die Eigenschaften von Brennpunkt und Kugelmittelpunkt benutzt.

Auch die Zusammensetzung der Abbildung von spiegelnden Flächen unter sich wie mit brechenden Flächen erfolgt nach den obigen Formeln, wie bei ebenen Spiegeln ist aber das Bild einer ungeraden Anzahl von Spiegelungen spiegelverkehrt.

Wenn nun der Dingpunkt im Sinne der Lichtrichtung auf der Achse wandert, so ändern sich Bildlage und Bildgröße. Das Bild wandert dabei in der gleichen Richtung, bei positiver Brennweite nimmt die Vergrößerung fortwährend ab, bei negativer zu. Wandert bei positiver Brennweite der Gegenstand auf der Achse von ∞ über den vorderen negativen Hauptpunkt, den vorderen Brennpunkt, den vorderen Hauptpunkt bis ∞ , so wandert das Bild vom hinteren Brennpunkt über den hinteren negativen Hauptpunkt, ∞ , den hinteren Hauptpunkt bis zum hinteren Brennpunkt, die Vergrößerung geht dabei von 0 über -1 , ∞ , $+1$ zu 0. Bei negativer Brennweite entsprechen denselben Vergrößerungen entgegen-

gesetzte Vorzeichen für Bild- und Dinglage. Negative Vorzeichen von β bedeuten umgekehrtes Bild. Bei einem dünnen Linsensystem werden also bei Umkehrung des Vorzeichens der Brennweite reelle Ding- und Bildpunkte virtuell und umgekehrt. Die Winkelvergrößerung ist immer der Kehrwert der Quervergrößerung. Die Vergrößerung eines kleinen Stückes der Achse, das Verhältnis der Schnelligkeit des Wanderns von Bild und Ding, ist nach (20) das Quadrat der Quervergrößerung. Abb 13 und 15 zeigen bei der Sammellinse für einige Dinglagen, wie man mit

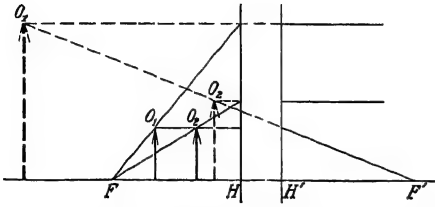


Abb 15 Die Abbildung durch eine Sammellinse bei virtuellem Bild

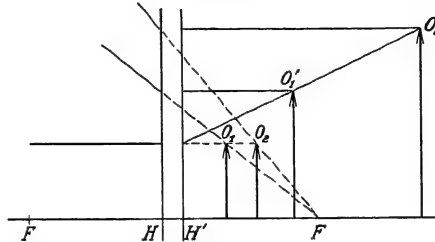


Abb 16 Die Abbildung durch eine Zerstreuungslinse bei reellem Bild

Hilfe der ausgezeichneten Punkte Bildlage und -größe konstruiert, Abb 16 gilt für die Zerstreuungslinse, bei der F und F' umgekehrt liegen.

11 Das teleskopische System Wenn bei der Zusammensetzung eines Systems aus zwei Teilen der hintere Brennpunkt des ersten Teils mit dem vorderen des zweiten zusammenfällt, so wird die Gesamtbrennweite unendlich. Parallel einfallende Strahlen, auch wenn sie zur Achse geneigt sind, haben ihren Vereinigungspunkt in der gemeinsamen Brennebene F der Teilsysteme (Abb 17). Sie treten daher auch parallel aus. Es ist dies der Fall des Fernrohrs, wenn Ding und Bild im Unendlichen liegen. Daraus, daß ein Strahl, der zur Achse parallel ist, wieder parallel austritt, ergibt sich, daß die Quervergrößerung einen festen, von der Dinglage unabhängigen Wert hat, dann sind aber auch Winkel- und Tiefenvergrößerung konstant. Daß die Winkelvergrößerung unabhängig von der Lage der zugeordneten Punkte

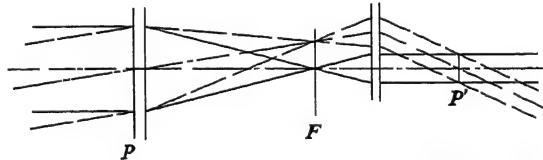


Abb 17 Die Abbildung durch ein teleskopisches System

ist, folgt auch daraus, daß ein schräg einfallendes paralleles Strahlenbündel, dessen Strahlen die Achse in den Dingpunkten schneiden, wieder als solches austritt. Man bezeichnet ein solches System mit fester Vergrößerung auch als teleskopisch, afokal. Wenn man berücksichtigt, daß für die gemeinsame Brennebene die Neigung eines Strahls $u_2 = u'_1$ und die Durchtrittshöhe $y_2 = y'_1$ ist, wobei die Zeichen 1 und 2 sich auf das erste und zweite Teilsystem beziehen, so folgt aus den Gleichungen (31) und (32) für die festen Werte B und I' der Quer- und Winkelvergrößerung

$$B = -f_2 / f_1, \quad I' = -f_1 / f_2 \quad (40)$$

Die Lage des Bildpunktes findet man mit Hilfe der Tiefenvergrößerung B^2 , die hier auch für endliche Strecken denselben Wert wie für kleine hat, indem man den Abstand des Ding- bzw. Bildpunktes von der Ding- bzw. Bildebene eines zugeordneten Paares von Ebenen rechnet, z B von der vorderen Hauptebene des ersten Teilsystems bzw. ihrem Bild durch das ganze System, in Abb 17 mit

P und P' bezeichnet. Hierher gehört auch der Fall der GAUSS'schen Abbildung durch eine planparallele Platte von der Dicke d . Da senkrecht zur Platte eintretende Strahlen ungebrochen bleiben, ist $B = 1$ und daher auch $\Gamma = 1$, Bild und Gegenstand sind daher kongruent. Zugeordnete Punkte sind aber um ein festes Stück in Richtung der Senkrechten zur Platte verschoben. Wie man aus Abb 4 für einen Punkt in der Eintrittsebene folgert, ist der Abstand des Bildpunktes von der Austrittsebene $d n$, die Verschiebung $(n - 1)d n$ in der Lichtrichtung, wenn n klein angenommen wird. Es ist, als ob statt der Glasplatte eine Luftplatte mit der Dicke $d n$ durchlaufen wäre. Man spricht daher von dem auf Luft umgerechneten Glasweg, rechnet man für die Glasplatte mit diesem Weg, so wird der Abstand des Vereinigungspunktes der Strahlen von einem Bezugspunkte durch das Einschalten der Platte nicht geändert. Da das Bild dem Auge so genähert ist, erscheint es unter größerem Sehwinkel, d. h. vergrößert, wenn nicht seine Entfernung groß gegen die Plattendicke ist. Auch Systeme von brechenden Prismen sind teleskopische Systeme, für die Abbildung gelten die obigen allgemeinen, nicht auf die Achse beschränkten Abbildungsgleichungen im Hauptschnitt und im dazu senkrechten Schnitte, insbesondere gelten die Beziehungen zwischen den verschiedenen Vergrößerungen. Im Falle des Minimums der Ablenkung ist β im und senkrecht zum Hauptschnitt gleich, mithin auch die Tiefenvergrößerung, der vorhandene Astigmatismus ist also nur durch die verschiedene Lage der Grundebenen für die beiden Schnitte bedingt, ist also von der Dinglage unabhängig, wie schon in Ziff 4 erwähnt. Diese Unabhängigkeit gilt auch für den Astigmatismus bei schiefem Durchgang durch die Planplatte.

12 SEIDEL'S Theorie der Bildfehler Wenn von einem Dingpunkt ein Strahlenbündel endlicher Öffnung ausgeht, so werden die Strahlen nach dem Durchtritt durch das System nicht wieder genau in einem Punkt vereinigt, man erhält vielmehr auf dem Auffangschirm eine Zerstreuungsfigur, die nun näher untersucht werden soll. Zu dem Zweck kann man eine genügende Anzahl passend ausgewählter Strahlen trigonometrisch durchrechnen und die Durchtrittsstellen in einer zur Achse oder zum Leitstrahl senkrechten Ebene in der Nähe der engsten Einschnürung des Bündels auf der Bildseite bestimmen. Es genügt die Untersuchung der Abbildung einer beliebigen achsensenkrechten Ebene. Wir wählen zunächst als Auffangebene die GAUSS'sche Bildebene, d. h. die achsensenkrechte Ebene in dem GAUSS'schen Achsenbildpunkt. Der Punkt O in der Dingebene (Abb 18), von dem die Strahlen ausgehen, sei durch den Abstand γ von der Achse gegeben, die durch diesen Punkt und die Achse gelegte Ebene werde als

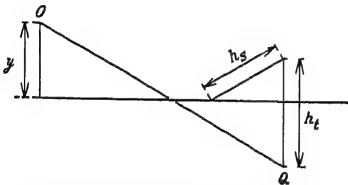


Abb 18 Zu SEIDEL'S Theorie

Hauptschnitt bezeichnet. Um einen Strahl festzulegen, wird als zweiter Punkt Q auf ihm der Durchstoßpunkt mit der Ebene der Eintrittspupille gewählt, die die Öffnung des von der Dingebene ausgehenden Strahlenbündels begrenzt und deren Mitte der Krüzungspunkt der Hauptstrahlen ist (Ziff 24). Der Abstand des Punktes Q vom Hauptschnitt sei h_s , und der Abstand seiner Projektion in diesen Schnitt von der Achse sei h_t , h_s und h_t sind die Komponenten des Abstandes des Punktes Q von der Achse. Die entsprechenden Komponenten des Abstandes des Durchstoßpunktes auf dem Auffangschirm, gerechnet von dem zu O gehörigen, durch den Hauptstrahl bestimmten Bildpunkt O' in der Auffangebene, seien δ_s und δ_t . Man kann nun auf Grund der Durchrechnung δ_s und δ_t als Funktionen von γ , h_t und h_s darstellen oder auch als Funktionen dieser Größen dividiert durch den Abstand der Dingebene von der Eintritts-

pupille, der Hauptstrahlneigung w und der Komponenten u_t und u_s des Öffnungswinkels, es können ferner statt der Größen für den Dingraum die entsprechenden in dem Bildraum gewählt werden. Entwickelt man nun diese Funktionen nach Potenzen der Veränderlichen, so können wegen der Achsensymmetrie die Veränderlichen allein oder ihre Produkte, wenn man hier die Potenzzahlen der Faktoren addiert, nur in ungeraden Potenzen vorkommen. Durch die Wahl der GAUSS'schen Bildebene sind die der ersten Potenz entsprechenden weggefallen. In erster Näherung sind also die Größen δ_s und δ_t Funktionen, in denen die Veränderlichen zusammen oder einzeln in der dritten Potenz vorkommen, und zwar ergibt die Ableitung nach SEIDEL¹

$$\delta_s = A(u_t^3 + u_s^3)u_t + B(3u_t^2 + u_s^2)w + Cu_t w^2 + Ew^3, \quad (41)$$

$$\delta_t = A(u_t^3 + u_s^3)u_s + 2Bu_t u_s w + Du_s w^2 \quad (42)$$

Als Beispiel mögen hier die Werte von δ_s und δ_t für das Königsberger Heliometerobjektiv von FRAUNHOFER mit herangezogen werden, dessen Durchmesser 158 und dessen Brennweite 2553 mm beträgt. Es ist von STEINHEIL² sowohl für einen Dingpunkt in der Achse wie für einen solchen in 48' Winkelabstand davon durchgerechnet worden. Es wurden in drei Zonen mit einem Drittel, zwei Drittel und vollem Durchmesser des Objektivs je acht Strahlen in gleichen Abständen, von denen zwei im Hauptschnitt lagen, durchgerechnet, und zwar sowohl für das Objektiv mit den vorhandenen kleinen Resten von sphärischer Abweichung und Koma als auch nach Beseitigung dieser durch kleine Radienänderung. Die Ergebnisse der Rechnungen STEINHEILS für den ersten Fall werden mit guter Annäherung durch den Ansatz nach (41) und (42) dargestellt, wenn man $A = -56$, $B = +264$, $C = -1872$ und $D = -759$ setzt, u_t , u_s und w gelten für den Bildraum und sind in Bogenmaß zu nehmen, w außerdem positiv. Für das ursprüngliche Objektiv sind die Radien, Dicken und Brechzahlen in Ziff 39 aufgeführt, die von STEINHEIL gefundenen Abweichungen in Abb 25 dargestellt.

13 Die Verzeichnung. Für die Kennzeichnung der Art der Zerstreuungsfigur und insbesondere für ihre Verkleinerung bei der Berechnung eines optischen Systems ist es nun zweckmäßig, die einzelnen Glieder des obigen Ausdrucks als verschiedene Bildfehler zu deuten. Dabei ist das, was den Bildfehler kennzeichnet und bei den Gliedern mit A , B , C , D die Art der Strahlenvereinigung bestimmt, allein dadurch gegeben, welche Potenzen von u_s , u_t , w vorkommen. Die Konstanten A , B , C , D , E betreffen nur die Größe des Bildfehlers, wie sie aus den gegebenen Daten des Systems zu berechnen sind, wird hier nicht erörtert. Untersuchen wir zunächst die Zerstreuungsfigur außer der Achse, so bedeutet das Glied mit w^3 eine Abweichung des Durchstoßungspunktes des Hauptstrahls von dem GAUSS'schen Bildpunkt außer der Achse. Es ist der Fehler der Verzeichnung, der schon in Ziff 4 behandelt wurde. Meist gibt man die Verzeichnung in Prozenten der Größe des Bildes an, sie ist dann w^2 proportional. Infolge der Verzeichnung werden Gerade in der Dingebene, die nicht durch die Achse gehen, als gekrümmte Linien wiedergegeben. Zu einer Dinggeraden im Abstand y von der Achse gehört statt einer Bildgeraden im Abstand $y' = \beta y$ von der Achse eine gekrümmte Linie im Abstand $y' + \delta y'$, deren Krümmungsradius genähert $= y'^2 / 2\delta y'$ ist. Man unterscheidet kissen- und tonnenförmige Verzeichnung, je nachdem die gekrümmten Linien ihre erhabene oder hohle Seite

¹ Astr. Nachr. 43, S. 289 (1856), von neueren Darstellungen seien nur erwähnt KIEBLER, Beiträge zur Dioptrik, Heft 2, Leipzig, Fock 1896 (auch in v. ROHR, Die Bildzeichnung in optischen Instrumenten, Berlin, Julius Springer 1904), Z. f. Instr. 41, S. 289 (1921), SCHWARZSCHILD, Gott. Abh. N.F. 4, Nr. 1 (1905), RAYLIGHT, Phil. Mag. 15, S. 677 (1908).

² Munch. Ak. Ber. 19, S. 413 (1889).

der Achse zukehren. Für die Verzeichnungsfreiheit (Orthoskopie) gilt als Bedingung

$$\frac{v'}{v} = \frac{\xi' + \frac{1}{2} \operatorname{tg} w'}{\xi + \frac{1}{2} \operatorname{tg} w} = \beta, \quad (43)$$

wo ξ der Abstand der Dingebene vom Kreuzungspunkt P der Hauptstrahlen im Dingraum und ξ' der Abstand der Bildebene (achsensenkrechten Aufnahmeebene nach Ziff 24) vom Kreuzungspunkt P' der Hauptstrahlen im Bildraum Δ_p bzw. Δ'_p die sphärische Langsabweichung von P bzw. P' für die Hauptstrahlneigung w bzw. w' im Ding- bzw. Bildraum ist¹. Nur in diesem Fall werden Gerade in der Dingebene als Gerade wiedergegeben. Die Verzeichnung ist bei dem Heliometerobjektiv Null, ist nämlich bei einem Objektiv die Dicke gering gegen die Brennweite und kreuzen sich die Hauptstrahlen im Objektiv, so heben sich die Brechungen beim Ein- und Austritt für jede Linse nahezu auf, und bei mäßiger Größe von w tritt daher keine Verzeichnung auf, die Bildgröße in der Bildebene ist $v' = f \operatorname{tg} w$. Ueber die Verzeichnung durch eine Planplatte siehe LUDENDORFF und ZAAR².

14 Bildkrümmung und Astigmatismus Die weiteren Fehler sind von u_t und u_s abhängig, sie betreffen daher die Strahlenvereinigung, die Schärfe des

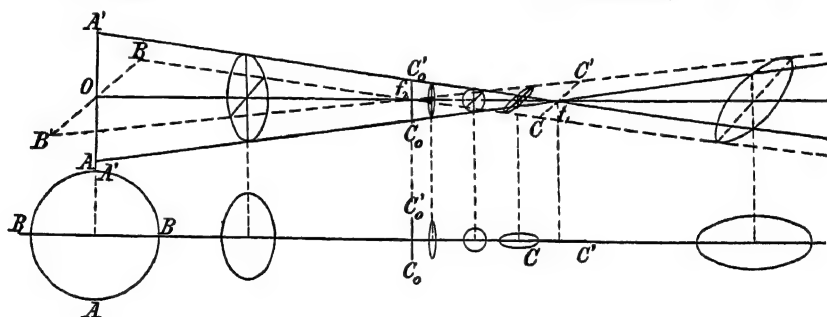


Abb 19 Ein mit Astigmatismus behaftetes Bündel

Bildes. Wir nehmen zunächst an, daß das Bündel so eng ist, daß nur die Glieder mit u_t und u_s zu berücksichtigen sind. Es mögen nun für Kreise in der Öffnung, deren Mitten in der Achse liegen, kurz für Zonen der Öffnung, die entsprechenden Kurven in der Zerstreuungfigur untersucht werden. Statt der Kreise in der Öffnung kann man auch Quadrate wählen, deren Seiten gleichen Werten von u_t und u_s entsprechen. Im allgemeinen entsprechen den Kreisen hier elliptische Abweichungskurven, den Quadraten Rechtecke. Alle dem Hauptschnitt parallele Ebene Buschel haben dieselbe Seitenabweichung und damit auch dieselbe Langsabweichung δ_t ihres Schnittpunktes. Diese Schnittpunkte bilden so eine kurze, achsensenkrechte Gerade, die tangential Brennlinie f_2 in Abb 19, das Entsprechende gilt für die zum Hauptschnitt senkrechten ebenen Buschel, sie bestimmen eine sagittale Brennlinie f_1 , die aber an anderer Stelle des Hauptstrahls liegt wie die tangential. Die Lage dieser beiden Brennlinien kann mit Hilfe von Formel (28) gefunden werden. Da hier die Strahlen eines Bündels auch bei enger Öffnung nicht mehr in einem Bildpunkt vereinigt werden, nennt man das Bündel astigmatisch (Ziff 4), der Abstand f_1/f_2 der Brennlinien, die Brennweite, dient als Maß des Astigmatismus. Abb 19 zeigt, wie sich bei Verschiebung

¹ V. ROHR, Z f Instrk 17, S 271 (1897), 18, S 4 (1898)

² LUDENDORFF, A N 166 S 162 (1904), ZAAR, Phot Korrt 56, S 301 (1919), Arch f Photogrammetrie 6, S 182 (1919/23)

der Auffangebene in der Achsenrichtung der Querschnitt eines astigmatischen Bündels bei kreisförmiger Öffnung ändert, in der Mitte der Brennstrecke ist die Zerstreuungsfigur ein Kreis. Diese Erscheinung bei Änderung der Einstellung zeigt auch das Heliometerobjektiv nach Hebung der Restfehler. Man kann die Erscheinung bei einem größeren Fernrohr an dem Steinbild nicht zu weit außer der Achse bei monochromatischem Licht gut beobachten (s. auch Ziff 32). Da der Abstand der Brennpunkte von der GAUSS'schen Bildebene mit w^2 wächst, liegen innerhalb der hier geltenden Näherung die tangentialen bzw. sagittalen Brennpunkte je auf einer der GAUSS'schen Bildebene in der Achse beruhenden Kugel mit einer C bzw. D proportionalen Krümmung (Kehrwert des Radius) ϱ_t bzw. ϱ_s . Handelt es sich um die Abbildung eines durch die Achse gehenden geraden Durchmessers in einer achsensenkrechten Ebene, so liegen die sagittalen Brennpunkte sich überdeckend in einem Durchmesser als scharfes Bild, die Gesamtheit solcher Durchmesser wird so auf der sagittalen Bildkugel scharf abgebildet. Handelt es sich dagegen um die Abbildung von zur Achse konzentrischen Kreisen in dieser Ebene, so sind die Bilder wieder zur Achse konzentrische, scharfe Kreise, deren Gesamtheit auf der tangentialen Bildkugel liegt. Diese Linien nennt man abbildbare Linien. Zu anderen Linien gibt es überhaupt kein scharfes Bild. Den Unterschied der beiden Bildkrümmungen $\varrho_t - \varrho_s$ bezeichnet man als den Astigmatismus schiefen Bündel des Systems, spricht man von dem Astigmatismus für eine bestimmte Hauptstrahlneigung oder von dem eines Bündels, so ist der Abstand der Brennpunkte gemeint, das Fremdwort drückt aus, daß die Strahlen nicht in einem Punkt zusammenlaufen. Den Mittelwert von ϱ_t und ϱ_s nennt man die Bildfeldkrümmung im übertragenen Sinne. Ist $\varrho_t - \varrho_s = 0$, so nennt man das System für das vorliegende Feld punktuell abbildend oder astigmatisch korrigiert, ist $\varrho_t + \varrho_s = 0$, so nennt man es auf Bildfeldebene im übertragenen Sinne korrigiert, ist $\varrho_t = \varrho_s = 0$, so besitzt das System Ebnung des punktuellen Feldes oder anastigmatische Bildfeldebahnung, es ist anastigmatisch.

15 Die Koma. Die Glieder mit dem Faktor B werden als die Koma bezeichnet, der Name gründet sich auf die schweifartige Unsymmetrie der Zerstreuungsfigur. Bei kleiner Hauptstrahlneigung und -öffnung, wie es hier der Fall ist, haben die drei Glieder den gleichen Faktor, bei endlicher Hauptstrahlneigung und kleiner Öffnung haben nur die Glieder mit u_t^2 und $u_s u_t$ den gleichen Faktor. In Abb 20a ist für das halbe Objektiv mit quadratischer Öffnung und mit Halftungslinie im Hauptschnitt die Zerstreuungsfigur in der GAUSS'schen Bildebene für einen nur mit Koma behafteten Bildpunkt dargestellt, den ausgezogenen bzw. gestrichelten Geraden in der Öffnung entsprechen die gleichbezeichneten Linien in der Zerstreuungsfigur. Der Kürze des Ausdrucks wegen werde der Hauptschnitt senkrecht angenommen. Entsprechend dem Glied mit u_t^2 treffen Strahlen im Hauptschnitt, die gleich viel über und unter der Mitte die Öffnungsblende durchsetzen, dieselben Punkte in der Zerstreuungsfigur. Abb 21 stellt die u_t proportionale Langsabweichung außer der Achse im Hauptschnitt dar, den in S_2 und S_{II} einfallenden Strahlen entsprechen die Langsabweichungen 0, 2 und 0, II Strahlen, die die Öffnungsblende symmetrisch zu einem waagerechten Durchmesser durchsetzen, treffen die Figur in Punkten, die symmetrisch zum Hauptschnitt liegen. Die lineare Durchbiegung der den horizontalen Öffnungsgeraden entsprechenden Linien ist für alle gleich und auf das Glied mit u_t^2 zurückzuführen. Das Glied mit $u_s u_t$ bringt zum Ausdruck, daß die sagittale Schnittweite sich mit der Höhe ändert, in der das sagittale Bündel die Öffnung durchsetzt. Die Breitenverbreiterung der den Öffnungswaagerechten entsprechenden Linien nimmt mit der Durchtrittshöhe gleichmäßig zu, dadurch ist der einem

Dreieck mit gekrümmten Linien entsprechende Umriß der Zerstreuungsfigur bedingt Statt die Zerstreuungsfigur entsprechend rechtwinkligen Öffnungs-

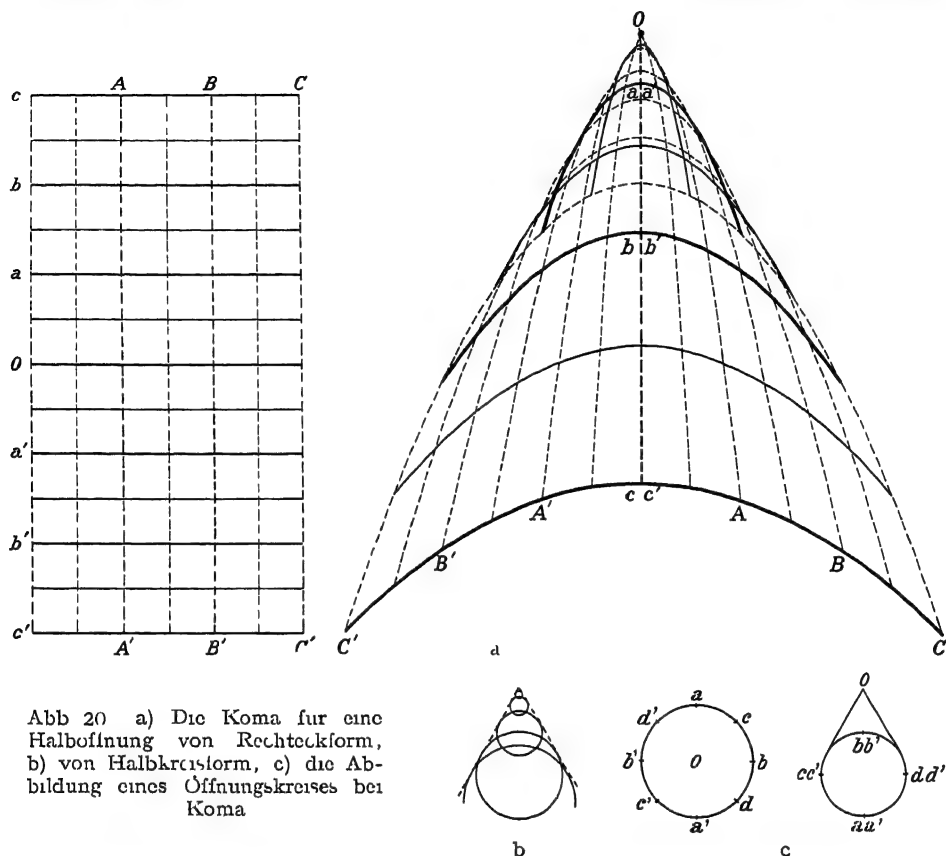


Abb 20 a) Die Koma für eine Halboffnung von Rechteckform, b) von Halbkreisform, c) die Abbildung eines Öffnungskreises bei Koma

koordinaten darzustellen, kann man sie auch entsprechend Polarkoordinaten darstellen. Diese Art gibt aber nicht wie die erste ein unmittelbares Bild der

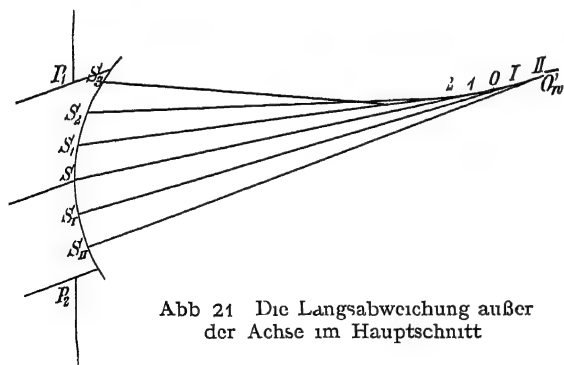


Abb 21 Die Longsabweichung außer der Achse im Hauptschnitt

Lichtverteilung der Zerstreuungsfigur auf Grund der geometrischen Optik. Den Öffnungshalbkreisen mit wachsendem Durchmesser entsprechen hier Zerstreuungskreise mit wachsendem Durchmesser und wachsender Exzentrizität, die von zwei Geraden berührt werden, die mit dem Hauptschnitt einen Winkel von 30° bilden (Abb 20b). Wie Abb 20c zeigt, entspricht

dem Polarwinkel in der Öffnung der doppelte in der Zerstreuungsfigur, einem Punkt der Zerstreuungsfigur entsprechen im großen und ganzen zwei Punkte der Öffnung. Abb 22 zeigt in photographischer Aufnahme, wie das Aussehen eines

Bildpunktes, einer Geraden im Hauptschnitt und einer solchen senkrecht dazu durch die Koma verändert wird

Bei dem Parabolspiegel ist für einen unendlich fernen Bildpunkt das Bild außer mit Koma noch mit tangentialer Bildkrümmung behaftet, es tritt also noch ein Glied mit u hinzu Abb 23a zeigt die der Hälfte einer gleichen quadratischen Öffnung entsprechende Zerstreuungsfur eines außersaxialen Bildpunktes Strahlen im Hauptschnitt, die gleich viel über oder unter der Mitte der Öffnung durchgehen, fallen hier nicht mehr in denselben Punkt der GAUSSSchen Bildebene Entsprechend ist, roh ausgedrückt, die eine Hälfte der Zerstreuungsfur gegenüber der reinen Koma in senkrechter Richtung zusammengedrückt, die andere gestreckt a, b, c entsprechen den halben Öffnungswinkeln $u = 1, 2, 3^\circ$ O ist der

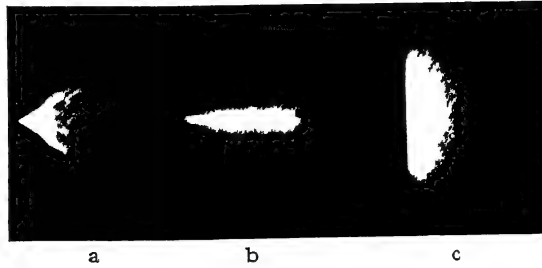


Abb 22 Das mit Koma behaftete Bild a) eines Punktes, b) einer Geraden im Hauptschnitt, c) einer solchen senkrecht dazu

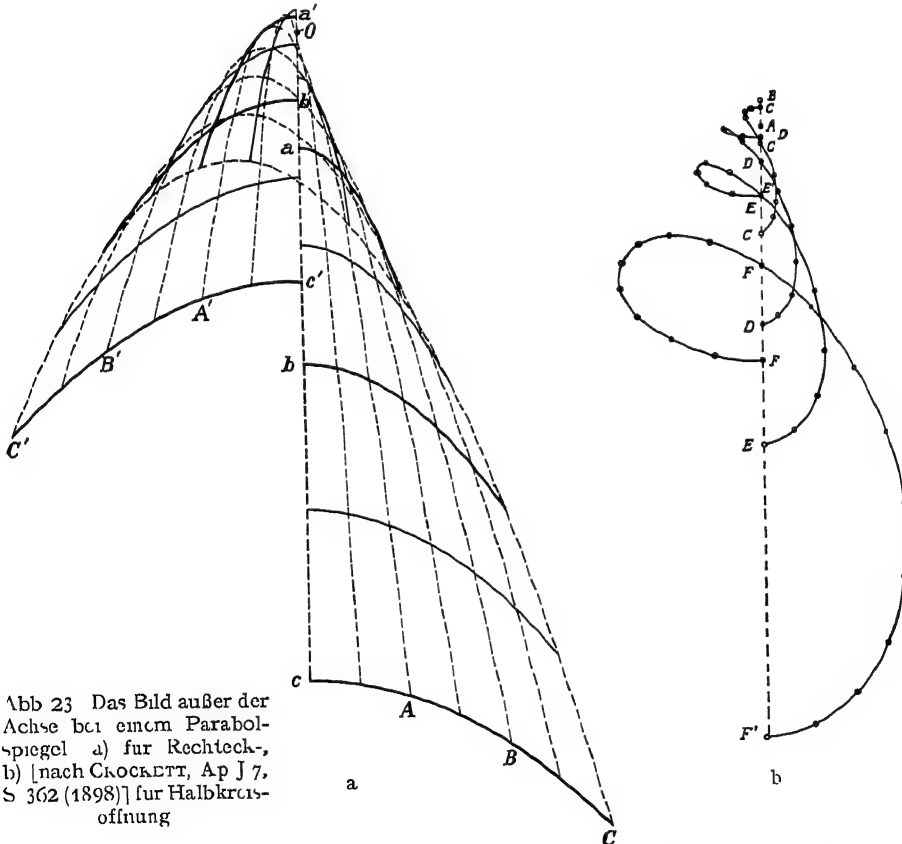


Abb 23 Das Bild außer der Achse bei einem Parabolspiegel a) für Rechteck-, b) [nach СКОБЕЛЕТ, Ap J 7, S 362 (1898)] für Halbkreisöffnung

Durchstoßungspunkt des Hauptstrahls, w ist 1° Abb 23b zeigt die Zerstreuungsfur für den Parabolspiegel entsprechend konzentrischen Öffnungskreisen

Die mit C, D, E, F beginnenden Kurven entsprechen $u = 1, 1\frac{1}{2}, 2, 3^\circ$, A ist der Durchstoßungspunkt des Hauptstrahls, $AF = 0,00002F$. Die dichteste Strahlenvereinigung liegt nach der Achse zu. Es sei noch bemerkt, daß die beiden Einhüllenden der Kurven die äußere Begrenzung des Doppelschweres in dem Sternbild nach Abb 80a darstellen. Für kleine w und große u nähert sich das Aussehen des Sternbildes beim Parabolspiegel immer mehr der reinen Koma.

Endlich kann man noch ein einfaches Kennzeichen für die Aufhebung der Koma bei endlicher Öffnung und kleiner Hauptstrahlenneigung angeben, die ABBESche Sinusbedingung. In der von STAEBLE¹ erweiterten Form lautet sie: Im axialen Buschel muß sich das Verhältnis $\sin u' / \sin u$ mit u in demselben Verhältnis ändern wie die Schnittweite des Bildstrahls, gerechnet von dem Kreuzungspunkt der bildseitigen Hauptstrahlen.

16. Die sphärische Abweichung Die Glieder mit dem Koeffizienten A hängen nicht mehr von w ab, sie liefern also in und außer der Achse denselben

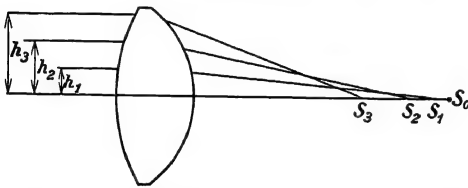


Abb 24 Die sphärische Abweichung einer einfachen Sammellinse

Beitrag. Es genügt daher, diesen Fehler für den Achsenpunkt zu untersuchen. Infolge der Achsensymmetrie hat die Seitenabweichung denselben Polarwinkel wie der Durchstoßungspunkt in der Öffnung, und die radiale Seitenabweichung δ ist der dritten Potenz des radialen Öffnungswinkels u proportional. Man bezeichnet diesen Bildfehler als die

sphärische Seitenabweichung in der Achse. Gegebenen Zonen der Öffnung entsprechen konzentrische Kreise der Zerstreuungsfigur. Die Strahlen eines jeden Kreises schneiden sich in einem Punkt der Achse. Man spricht daher auch von sphärischer Längsabweichung δu für eine bestimmte Zone der Öffnung, die der zweiten Potenz des Öffnungswinkels

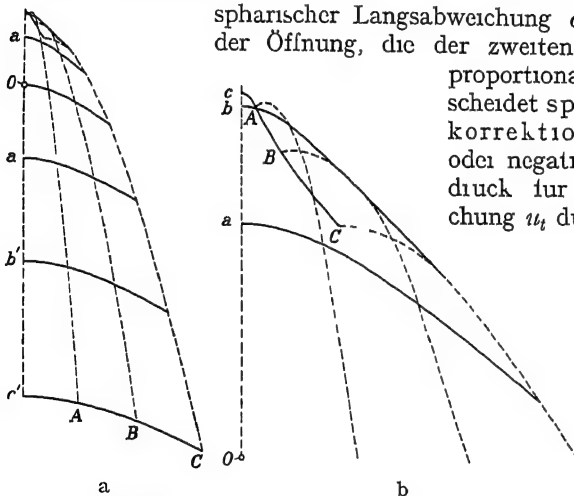


Abb 25 Das Bild außer der Achse beim Königsberger Helimeterobjektiv für eine Rechtecköffnung

proportional ist (Abb 24), und unterscheidet sphärische Über- und Unterkorrektur, je nachdem $s'_{Hd} - s'_H$ positiv oder negativ ist. Wenn man in dem Ausdruck für die sphärische Seitenabweichung u_i durch $u_i + mw$ ersetzt, so erhält man für δ_i und δ Werte von der gleichen Art wie in Ziff 12, d. h. der Bau eines schiefen Bündels ist von der gleichen Art wie der des exzentrischen Teils eines axialen Bündels.

Endlich möge noch die Zerstreuungsfigur in der GAUSSischen Bildebene für das eingeschriebene Quadrat der Öffnung des Helimeterobjektivs behandelt

werden (Abb 25, b zeigt das obere Stück 5 mal vergrößert). Die tangential und sagittale Bildkrümmung gibt sich darin kund, daß für kleine Öffnung die

¹ Munch Ak Ber 1919, S 163, LIHOTZKY, Wiener Ak Ber 128, S 85 (1919)

horizontale und die vertikale Gerade durch den Durchstoßungspunkt des Hauptstrahls eine merkliche Größe haben. Im allgemeinen entspricht ein Punkt der Zerstreuungfigur nur einem Punkt der Öffnung. Das Glied mit u_1^2 hat hier nur die Wirkung, daß die Durchtrittsstellen im Hauptschnitt nicht mehr symmetrisch sind. Das Glied mit u_1^3 zieht die Durchstoßungspunkte am oberen und unteren Ende der Hauptschnittgeraden mehr auseinander. Das Glied mit u_1^4 macht sich in der Durchbiegung der den Öffnungswaagerechten entsprechenden Linien geltend, die lineare Durchbiegung ändert sich aber entsprechend $u_1^2 u_2$ mit der Durchtrittshöhe in der Öffnung. Ebenso ändert sich entsprechend $u_1 u_2^2$ die Breitenerstreckung dieser Linien nicht mehr gleichmäßig. Das Glied mit u_1^5 bringt ferner zum Ausdruck, daß die Durchstoßungspunkte auf diesen Linien nach der Seite mehr auseinandergezogen sind. Bezüglich der Darstellung für Polarkoordinaten in der Öffnung sei auf STEINHEIL (Ziff 12) verwiesen.

17 Zonenfehler Für größere Öffnung und größere Hauptstrahlenneigung macht man von Reihenentwicklungen wenig Gebrauch. Man spricht dann nur noch von der sphärischen Langsabweichung für eine bestimmte Zone. Man rechnet für verschiedene Zonen trigonometrisch durch und stellt die sphärische Langsabweichung als Funktion der Einfallshöhe in der Eintrittspupille dar.

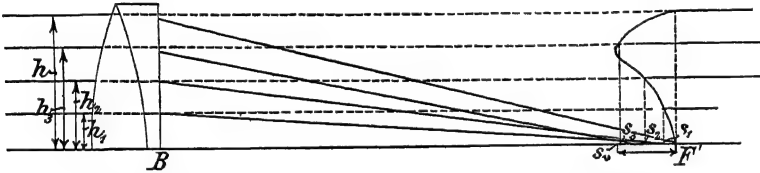


Abb 26 Der Zwischenfehler der sphärischen Abweichung

Ist die sphärische Abweichung in der Achse für die Randzone der Öffnung Null, so spricht man von einer Hebung der sphärischen Abweichung, obwohl im allgemeinen für die mittleren Zonen noch sphärische Abweichung besteht. Diese Restabweichung bezeichnet man als Zone oder Zwischenfehler der sphärischen Abweichung. Der größte Abweichungswert kann als Maß des Zonenfehlers dienen. Kann die sphärische Abweichung auf die Form $ku^3 + fu^5$ gebracht werden, so liegt das Maximum bei $u_{\text{max}} \sqrt{0,5}$, man pflegt die Langsabweichung als Funktion der Einfallshöhe darzustellen (Abb 26), in gleicher Weise pflegt man die Abstände der Punkte der sagittalen und tangentialen Bildfläche von der GAUSSischen Bildebene für einen Hauptschnitt als Funktion der Hauptstrahlenneigung w sowie auch die prozentische Verzeichnung graphisch darzustellen. Ähnlich wie von Zwischenfehlern der Öffnung kann man hier von Gesichtsfeldzwischenfehlern als Abweichung von dem w^2 proportionalen Gang reden. Abb 44b stellt die Bildkrümmung für ein PETZVALSches Objektiv dar. Ebenso wie man die sphärische Seitenabweichung für eine endliche Öffnung definiert, konnte man dies auf Grund der Darstellung des Zerstreuungskreises für rechtwinklige Öffnungskoordinaten auch für die den Gliedern mit $u_1^2 u_2$, $u_1^3 u_2$, $u_1^4 u_2$, $u_1^5 u_2$ und $u_1 u_2^2$ entsprechenden Bildfehler durchführen.

18 Die PETZVALsche Bedingung Vorzugsweise werden die behandelten Bildfehler dadurch gehoben, daß man Sammell- und Zerstreuungslinsen mit entgegengesetzter Abweichung zusammenstellt. Schon NEWTON bemerkte, daß man bei einem System, das aus einer Wasserlinse und zwei einschließenden Glaslinsen besteht, die sphärische Abweichung heben kann. Wegen seiner Wichtigkeit für das photographische Objektiv verdient noch ein näheres Eingehen der Satz

von PETZVAL¹, von dem er selbst sagt, daß er hinter bedeutenden Reihentwicklungen versteckt ist, aus denen er sich wie eine grunende Oase aus der Sandwüste heraushebt. Es soll hier eine unmittelbare Ableitung gegeben werden. Liegt bei einer Kugelfläche der Kreuzungspunkt der Hauptstrahlen, die Blendenmitte, in dem Kugelmittelpunkt C , so gehört zu einer Dingkugel um C eine Bildkugel um C , für deren Radien c und c' gilt die Formel (30) Ziff 9. Unter Beschränkung auf die SEIDELSCHE Theorie, aber bei beliebiger Lage der Blende auf der Achse soll nun weiter festgestellt werden, wie sich die Krümmung der Bildfläche mit der der Dingfläche ändert. Die Änderung dieser kann durch das Quadrat des Abstandes l einer Strecke parallel der Achse von dieser, dividiert durch die doppelte Länge $2a$ dieser Strecke gemessen werden, die die Verschiebung eines Bildpunkts bei Änderung der Krümmung darstellt, rechnet man die entsprechenden Bildgrößen aus und berücksichtigt die Beziehung (20) zwischen α und β (Ziff 9), so ergibt sich, daß die Änderung der Bildkrümmung dieselbe ist wie die der Krümmung der Dingfläche, wenn beide durch die betreffende Brechzahl dividiert werden. Es gilt also die Formel (30) Ziff 9 für beliebige Krümmung der Bildfläche. Es ist nun weiter zu untersuchen, wie sich die Bildkrümmung mit der Verschiebung des Kreuzungspunktes der Hauptstrahlen ändert, und zwar genügt dies für den Fall, daß die Dingkugelfläche zur Blende konzentrisch ist, da ja für andere Krümmungen dieser Fläche die Änderung dieselbe ist. Verlegt man nun bei einer brechenden Kugelfläche den Hauptstrahl von der Lage aus, wo er durch den Kugelmittelpunkt geht, so ist die Änderung der sagittalen Schnittweite nach Ziff 4 die sphärische Langsabweichung, der Unterschied der tangentialen und sagittalen Schnittweite aber doppelt so groß, mithin die Änderung der tangentialen Schnittweite dreimal so groß. Wenn man also von der Krümmung der Ding- und Bildfläche bei Kreuzung der Hauptstrahlen vom Kugelmittelpunkt ausgeht, ist die Änderung der Krümmung bei der tangentialen Bildfläche von ϱ_0 auf ϱ_t dreimal so groß wie die der sagittalen von ϱ_0 auf ϱ_s , d. h. der Wert von $3\varrho_s - \varrho_t$ gleich dem Wert von $2\varrho_0$, das Gleiche gilt für den Unterschied dieser Werte für Bild- und Dingraum, je durch die Werte dieser Brechzahl dividiert. Nun ist aber dieser Unterschied für $2\varrho_0$ gleich $2 \left(\frac{1}{n'} - \frac{1}{n} \right)$. Summiert man über ein System von brechenden Flächen, so ergibt sich für die zu einer Achsensenknechten gehörige Bildkrümmung, wenn das erste und letzte Mittel Luft ist,

$$\varrho_t - 3\varrho_s = -2 \sum \left[\frac{1}{n'} \left(\frac{1}{n'} - \frac{1}{n} \right) \right], \quad (44)$$

den Ausdruck rechts bezeichnet man wohl als die PETZVALSCHE Summe. Ist diese nicht gleich Null, so kann man das System entweder so korrigieren, daß der Astigmatismus aufgehoben ($\varrho_t = \varrho_s$), das System punktuell abbildend ist, oder daß $\varrho_t + \varrho_s = 0$ ist, für Bildfeldebnung im übertragenen Sinne. Stellt man im ersten Falle die Aufangebene so ein, daß die Zerstreuungskreise am Rande und in der Mitte gleich groß werden, im zweiten Falle in dem Achsenbildpunkt, so ist für den Bildrand der Zerstreuungskreis gleich groß. Ist die PETZVALSCHE Summe gleich Null, so ist anastigmatische Bildfeldebnung oder Ebnung des punktuellen Feldes in der Nähe der Achse vorhanden. Die PETZVALSCHE Summe ist also ein Maß für die erreichbare Korrektur in der Nähe der Achse, aber auch bei der Korrektur für ein größeres Feld gibt sie einen Anhalt dafür, wie man durch Änderung ihres Betrages die Korrektur noch verbessern kann. Wenn

¹ Bericht über die Ergebnisse einiger dioptrischer Untersuchungen. Pesth. Hartleben 1843. Wiener Ber. 24, S. 50 (1857), s. auch SCHIFFNER, Z. f. Math. u. Phys. 54, S. 92 (1907).

man diese Summe zugleich mit der Farbenlangsabweichung (Ziff 20) auf Null zu bringen sucht, bemerkt man, daß es von Vorteil ist, wenn Brechung und Dispersion der Glasarten gewissen Bedingungen genügen (hierauf beruht die Bedeutung der schweren Barytkrone für die photographischen Objektive) und wenn ein Randstrahl des von einem Achsenpunkt ausgehenden Bündels die Flächen des Systems in erheblich verschiedenen Höhen durchsetzt

19 Das Wesen der Farbenabweichung Wie schon NEWTON¹ feststellte, wird ein weißer Lichtstrahl bei der Brechung in seine farbigen Bestandteile zerlegt, aus dem Lichtstrahl entsteht ein Buschel in der Einfallsebene mit der Spitze im Einfallspunkt, das auf dem Auffangschirm ein Spektrum liefert. Nach der Wellentheorie werden die einzelnen Strahlen durch die verschiedenen Wellenlängen gekennzeichnet. Um die beobachtete Erscheinung darzustellen, zerlegt man den einfallenden weißen Strahl in zusammenfallende farbige Strahlen, die jeder für sich dem Brechungsgesetz folgen, für die aber die Brechzahlen in den beiden Mitteln je verschieden sind. Bei gut durchsichtigen Stoffen wächst die Brechzahl nach dem blauen Ende des Spektrums, also mit abnehmender Wellenlänge, diese Strahlen werden starker gebrochen. Den Unterschied der Brechzahlen für verschiedene Wellenlängen nennt man die Dispersion (Farbenzerstreuung), zur Kennzeichnung der Brechung muß also die Brechzahl für eine bestimmte Wellenlänge und die Dispersion für verschiedene Wellenlängenbezüge bekannt sein. Die genaue Kenntnis der Dispersion der verwendeten Glasarten ist nun für die praktische Optik von grundlegender Bedeutung. Es ist das besondere Verdienst von FRAUNHOFER², ein Verfahren für eine bequeme und sichere Messung geschaffen zu haben, indem er die Messung für die nach ihm benannten dunklen Linien des Sonnenspektrums durchführte. Statt der dunklen Linien benutzt man heute helle Linien, insbesondere die von Na, H und Hg, meist wird die Brechzahl des Glases als n_D und die Dispersion als $n_F - n_C$ angegeben, die Indizes C, D, F kennzeichnen die FRAUNHOFERSchen Linien mit den Wellenlängen 0,656, 0,589 und 0,486 μ . Die Farbenzerstreuung des Lichtes ist eines der größten Hindernisse einer guten Strahlenvereinigung. Alle die Abbildung kennzeichnenden Größen, die bei der Darstellung ihrer Abhängigkeit von den gegebenen Werten des Systems die Brechzahl enthalten, ändern sich mit dieser. Es ändern sich so nicht nur die Lage und Größe der Bilder, sondern auch die bisher untersuchten Bildfehler. Es entsteht eine Reihe seitlich verschobener und hintereinanderliegender verschiedener Bilder mit verschiedener Strahlenvereinigung. Alle diese Abweichungen faßt man als Farbenabweichungen (chromatische Aberrationen) zusammen. Zur Feststellung dieser Fehler kann man das optische Gerät für verschiedene Farben durchrechnen.

Will man wissen, welche Erscheinungen auftreten, wenn der Bildort auf der Achse sich mit der Farbe ändert, so ist die Lichtverteilung in der Umgebung des Bildorts zu untersuchen. Wir setzen zunächst so kleine Öffnung voraus, daß die sphärische Abweichung als für alle Farben gehoben gelten kann. Den Unterschied der Schnittweiten Vs' für zwei Farben bezeichnet man als Farbenlangsabweichung für diese Farben. Für Beobachtungssysteme gibt man sie meist für die Linien C und F an. In Abb 27 sei O'_F der Schnittpunkt der F-Strahlen, O'_C der der C-Strahlen. Einem einfallenden Dingstrahl mit der Neigung α

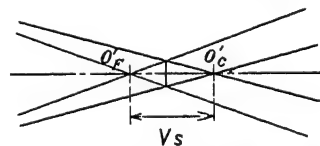


Abb 27 Der Zerstreungskreis der Farbenabweichung in der Achse

¹ Phil Trans abr 6-11 (1672-1676) Ostwalds Klass 96 S 74

² Munch Denkschr 5, S 193 (1814/5)

entsprechen im allgemeinen austretende Strahlen mit nur wenig verschiedener Neigung, so daß wir hier $u'_c = u'_f = u'$ setzen können. Die C -Strahlen bilden im Bildpunkt F und ebenso die F -Strahlen im Bildpunkt C einen Zerstreuungskreis von gleicher Größe. Der Radius dieses Zerstreuungskreises $r_c = V s' \operatorname{tg} u'$ ist gleich dem Durchmesser des Zerstreuungskreises mitten zwischen O'_c und O'_f und wird als Farbenseitenabweichung bezeichnet, sie gibt einen Anhalt für die Bildverschlechterung (s. Ziff 34). Dieser Zerstreuungskreis entspricht der engsten Einschnürung des Bündels. An dieser Stelle entsteht für eine mittlere Farbe zwischen C und F ein scharfer Bildpunkt. Alle anderen Farben bilden wieder Zerstreuungskreise, um so größere, je mehr ihre Wellenlänge von dieser mittleren Farbe abweicht. In dem Zerstreuungskreis treten so Mischfarben auf. Mit der Einstellung ändern sich die Farben sowohl des scharfen Kerns wie des verwaschenen Saums. Die Art der Farbenabweichung tritt noch deutlicher als hierbei hervor, wenn man die eine Hälfte der Öffnung des Systems abdeckt. Man erhält dann ein richtiges Spektrum, das allerdings nur für die eingestellte Farbe rein ist, nach den Seiten aber trüber wird, da sich die benachbarten Farben immer mehr überschieben. Man erkennt daraus auch, ob die Schnittweiten mit der Wellenlänge zu- oder abnehmen. Beobachtet man einen dunklen oder hellen Streifen auf hellem oder dunklem Grund, so wird das Spektrum auseinandergerissen, die Farben der einen Hälfte umsaumen den einen, die anderen den anderen Rand. Die Farbenlangabweichung kann ebenso auch außer der Achse des Systems auftreten und ist hier in erster Näherung gleich der in der Achse.

Hier kann sich aber der Fehler verschiedener Größe der Bilder dazugesellen. Man bezeichnet diesen Fehler als Farbenunterschied der Vergrößerung oder chromatische Vergrößerungsdefizienz, er bedeutet also eine Änderung der Vergrößerung bzw. bei Dingabstand ∞ der Brennweite mit der Farbe. Wenn die austretenden Hauptstrahlen in ihre farbigen Bestandteile zerlegt werden und den Auffangschirm an verschiedenen Stellen treffen, so wird der Bildpunkt in ein reines Spektrum ausgezogen. Ist Farbenlangabweichung vorhanden, so können die hintereinanderliegenden Bilder für verschiedene Farben verschieden groß sein, aber doch die Hauptstrahlen im Bildraum zusammenfallen, so daß die Bilder auf dem Auffangschirm gleich groß sind. Es ist daher zweckmäßig, den Farbenunterschied der Vergrößerung nur auf die verschiedene Größe der Bilder auf dem Auffangschirm zu beziehen, nur wenn die Farbenlangabweichung behoben ist, kann man diesen Fehler durch die Änderung der Quervergrößerung β mit der Farbe messen. Nimmt man an, daß die Farbenabweichung und der Abstand des Auffangschirms von der GAUSS'schen Bildebene klein ist, so ist der Farbenunterschied der Vergrößerung gehoben, wenn der Abstand der GAUSS'schen Bildebenen für die beiden Farben sich zum Abstand des Auffangschirms von dem Kreuzungspunkt der Hauptstrahlen verhält wie der Farbenunterschied $1/\beta$ von β zu der Quervergrößerung β selbst. Liegt das Bild oder der bildseitige Kreuzungspunkt der Hauptstrahlen im Unendlichen, so muß also für die Hebung $V\beta = 0$ sein. Hat man ein symmetrisches System, bei dem die Linsen zur Öffnungsblende symmetrisch liegen, so wird ein Hauptstrahl, von hier nach vorwärts und rückwärts verfolgt, gleiche Brechung erfahren. Der Durchstoßungspunkt des Hauptstrahls ist in der Ding- und Bildebene in das gleiche Spektrum ausgezogen. Laßt man nun die verschiedenfarbigen Hauptstrahlen auf der Dingsseite in einen zusammenfallen, so werden ebenso die bildseitigen zusammenfallen, da die Winkelvergrößerung $= -1$ ist. Auch für endliche Hauptstrahlenneigung ist bei einem solchen System der Farbenunterschied der Vergrößerung praktisch gehoben.

20 Die Berechnung der Farbenabweichung erster Ordnung. Für die Berechnung der Farbenabweichung sind Differenzen- oder Differentialformeln

zweckmäßig, besonders wenn man die Abhängigkeit der Farbenabweichung von den Bestimmungsgrößen und die Bedingungen des Baues farbenfreier Systeme kennenlernen will¹. Für einige einfache Fälle sollen solche Formeln aufgestellt werden. Bei dem dünnen Linsensystem gilt für den Kehrwert σ'_i der letzten, bildseitigen, Schnittweite s'_i , des Abstands des Bildpunkts von der k ten Linse, wenn σ_1 der Kehrwert der ersten, dingseitigen, Schnittweite und $q_i = 1/i$, die Einzelstärke der Linsen ist, wobei $q_i = (n_i - 1)(\varrho_{1,i} - \varrho_{2,i})$ ist,

$$\sigma'_k = \sigma_1 + \sum_{i=1}^k q_i \quad (45)$$

Es möge nun für die Änderung der Größen mit der Farbe allgemein das Zeichen V eingeführt und Vn ($n - 1$) = ν gesetzt werden. Bildet man nun Gleichung (45) für n und $n + Vn$ und zieht die eine Gleichung von der anderen ab, so ergibt sich

$$V\sigma'_i = \sum_{i=1}^k q_i \nu_i \quad (46)$$

$V\sigma'_i$ ist unabhängig von σ_1 . Aus $V\sigma'_i$ und σ'_i erhält man leicht die Farbenabweichung für den Bildort Vs'_i , die Farbenlongsabweichung. Es ist für kleine Abweichung $ds'_i = -s'^2_i d\sigma'_i$, und da hier für $s_1 = \infty$ gilt $ds'_i = df$ (der Änderung der Brennweite) und $d\sigma'_i = -df/f^2$, so ist $ds'_i = s'^2_i df/f^2$. Für die Abbildung im n -fachen Maßstabe ist $s'_i = (n + 1)f$, also $ds'_i = (n + 1)^2 df$. Wenn die Hauptstrahlen sich in der dünnen Linse kreuzen, also ungebrochen durchgehen, ist sie frei vom Farbenunterschied der Vergrößerung, obwohl die Größen der verschiedenfarbigen Bilder in ihren GAUSSISCHEN Bildebenen ebenso ungleich sind, d. h. die gleiche Abweichung in Prozents zeigen wie die Schnittweiten, das gilt auch für den Dingabstand unendlich, wo die Farbenabweichung der Brennweiten die gleiche wie die der Schnittweiten ist. Nach (46) gibt für die einfache dünne Linse ν an, der wievielte Bruchteil der Brennweite ihre Farbenabweichung angenähert ist. Der Durchmesser des kleinsten Zerstreuungskreises ist $D/2\nu$, wo D der Durchmesser der Öffnung ist.

Für ein dünnes Linsensystem aus mehreren Linsen kann man $\sum_{i=1}^k q_i \nu_i = \Phi/N$ setzen, wo $\Phi = \sum_{i=1}^k q_i \nu_i$ und N für dieses System dieselbe Bedeutung haben wie q und ν für die einfache Linse. Wendet man diese Gleichung auf ein System von zwei Linsen an, so ergibt sich bei gegebenem Φ und N

$$q_1 = \frac{\nu_1(\nu_2 - N)}{N(\nu_2 - \nu_1)} \Phi, \quad (47)$$

$$q_2 = -\frac{\nu_2(\nu_1 - N)}{N(\nu_2 - \nu_1)} \Phi \quad (48)$$

Ist also N gegeben, d. h. eine bestimmte Farbenabweichung für das System vorgeschrieben, so kann bei Verschiedenheit der Werte von ν_1 und ν_2 der Wert von q_1 und q_2 entsprechend bestimmt werden. Es können so Farbenabweichungen erreicht werden, die nicht nur den zwischen den ausgewählten Glasarten vorkommenden Werten von ν , sondern auch allen anderen, selbst negativen Werten entsprechen. Besondere Bedeutung hat der Fall $N = \infty$, wo die Brennweite für die beiden Farben gleich wird, die Gleichungen lauten

$$q_1 = \frac{\nu_1}{\nu_1 - \nu_2} \Phi, \quad (49)$$

$$q_2 = -\frac{\nu_2}{\nu_1 - \nu_2} \Phi \quad (50)$$

¹ SEIDLL, A. N. 37, S. 105 (1853), CHARLIER, Stockh. Akad. Förl. 55 u. 56 (1898/9), SCHWARZSCHILD, Gott. Abh. 1905, N. F. Nr. 1-3

Ein solches System nennt man für diese Farben *achromatisch* oder *farbenfrei*, das gilt für die Schnittweiten wie für die Brennweiten und auch für die Bildgröße, selbst wenn die Hauptstrahlen sich nicht in der dünnen Linse kreuzen und der Dingabstand endlich ist. Die Einzelstärken werden um so kleiner, je größer der ν -Unterschied und je kleiner die ν -Werte selbst sind. Ist $\Phi = 0$, das System afokal, so ist die Farbenabweichung von σ' durch $\varphi_1(1/\nu_1 - 1/\nu_2)$ gegeben. Eine solche Linse nach ROGERS¹ ändert die Farbenabweichung, ohne den Bildort erheblich zu verlegen, die eintretende Farbenlangabweichung ist dem Quadrat des Abstands des Bildpunkts von diesem System proportional.

Sind zwei einfache dünne Linsen durch einen endlichen Abstand getrennt, so kann die Farbenabweichung der Schnittweiten und der Vergrößerung nicht gleichzeitig gehoben sein. Der Fall, daß nur der letzte Fehler gehoben werden soll, hat besondere Bedeutung bei Okularen. Das Okular soll ein Bild im Unendlichen entwerfen oder doch in einem Abstande, der gegen die Brennweite groß ist. Es genügt so, wenn die verschiedenfarbigen Hauptstrahlen parallel austreten. Nimmt man ferner an, daß der dingsseitige Kreuzungspunkt der Hauptstrahlen in einem Abstand liegt, der gegen die Okularbrennweite groß ist, wie es z. B. bei starker vergrößernden Fernrohren der Fall ist, so ist das Verhältnis der Eintrittshöhe des Hauptstrahls zu seiner Austrittsneigung die Brennweite, und diese darf sich mit der Farbe nicht ändern. Nach (39) gilt nun für die Gesamtstärke

$$\Phi = \varphi_1 + \varphi_2 - A\varphi_1\varphi_2, \quad (51)$$

woraus für die Achromasie der Brennweite folgt, wenn $\nu_1 = \nu_2$ ist und der Farbenbezirk klein,

$$A = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (52)$$

21 Das sekundäre Spektrum Wenn zwei farbige Strahlen in einem Punkt vereinigt werden, so ist damit noch nicht gesagt, daß auch die übrigen farbigen Strahlen in diesem Punkt vereinigt sind, es kommt darauf an, wie der Gang der Dispersion ist, d. h. wie der Unterschied der Brechzahl einer dritten Farbe gegen die erste, die Teildispersion, sich zu dem Unterschied der Brechzahlen für die erste und zweite Farbe, der Grunddispersion, verhält. Dieses Verhältnis bezeichnet man als relative Teildispersion ϑ . Der der Teildispersion entsprechende ν -Wert ist also $\nu\vartheta$. Für ein dünnes Linsensystem ist die Farbenabweichung für die dritte Farbe, die durch ein vorgesetztes W statt durch V gekennzeichnet werde,

$$W\sigma'_k = \sum_{i=1}^k \vartheta_i \varphi_i \nu_i, \quad (53)$$

und da die Abweichungen nur klein sind, ist auch

$$Ws'_k = -s'^2_k \sum_{i=1}^k \vartheta_i \varphi_i \nu_i \quad (54)$$

Wurden nun die ϑ -Werte für eine dritte Farbe für alle Glasarten gleich sein, so würde bei einem System, bei dem die ersten beiden Farben vereinigt sind, auch die dritte Farbe vereinigt sein. Das ist im allgemeinen nicht der Fall. Indem man die durch die Vereinigung von zwei Farben erreichte Verbesserung als von erster Ordnung ansieht, nennt man Ws'_k das sekundäre Spektrum, das zuerst von CLAIRAUT² erkannt wurde. Um eine Übersicht über die Farbenabweichung für die verschiedenen Wellenlängen zu bekommen, stellt man Ws'_k

¹ Edinburgh J of Science 9, S 126 (1828), Pogg Ann 14, S 324 (1828)

² Mem de l'Acad de Paris 1762, S 578

als Funktion von λ dar. In der Abb 28 gilt die ausgezogene Kurve A für ein zweilinsiges Fernrohrobjektiv aus alten Glasarten. Die Abweichungen sind erheblich geringer wie bei einer einfachen Kronlinse, während bei dieser nahe $f_C - f_F = f_C/60$ ist, ist hier W/f in dem gleichen Farbenbezirk nur etwa gleich $f_C/2000$. Es wachsen von der hellsten Stelle des Spektrums bei $\lambda = 0,56 \mu$ die Abweichungen zunächst nur langsam an. Für die Nahe dieser Stelle ist zweckmäßig die Brennweite ein Minimum, wenn das System der Beobachtung dient¹. Verlegt man also von dieser Stelle die Einstellenebene nach außen, so geht auch die Farbe im Kern des Zerstreuungskreises in Mischfarben über, und zwar nach Purpur. Bei Abdeckung des halben Objektivs treten auch hier die Farbensäume an dunkeln bzw hellen Streifen hervor. Statt der grellen Spektralfarben bemerkt man hier nur zartere Mischfarben, die, je nachdem wie groß die Seitenabweichung ist und auf welche Wellenlänge das Minimum fällt, verschieden sind. Man vereinigt gewöhnlich die Strahlen für C und F , wenn das System zur Beobachtung irdischer Ziele dient. Das sekundäre Spektrum hängt von der Wahl der Glasarten ab. Die Werte von ϑ für die verschiedenen Farben ändern sich vom Übergang von einer Glasart zur anderen nahe in demselben Verhältnis. Man kann also den Gang der Dispersion für eine Glasart annähernd durch den ϑ -Wert für eine Farbe kennzeichnen. Stellt man für die optisch brauchbaren Glasarten den Wert von ϑ für die Wasserstofflinie $H\gamma$ als Funktion von ν für den Wellenlangenbezirk $C - F$ durch Punkte dar, deren Abszisse ν und deren Ordinate ϑ ist, so liegt der größte Teil der darstellenden Punkte nahe auf einer Geraden, auf ihr liegen auch die Punkte für $O 60$ und $O 103$, die Glasarten, für die die ausgezogene Kurve in Abb 28 gilt. Für diese gewöhnlichen Glasarten gilt nahe $\vartheta = 1,674 - 0,0018 \nu$, für sie ist also bei $H\gamma$ die Farbenabweichung $W/f = -0,0018/f$ und das sekundäre Spektrum unabhängig von der Wahl der Glasarten für das Objektiv. Setzt man bei einem dünnen zweilinsigen Objektiv die für die Achromasie geforderten Stärken ein, so wird

$$W/f = -\frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\nu_1 - \nu_2} / \quad (55)$$

Der ν -Unterschied der beiden Glasarten darf nur klein sein, damit bei kleiner Abweichung von ϑ von dem gewöhnlichen Wert, wie sie SCHÖLL bei Feinrohrlinse erreichte, doch eine erhebliche Verringerung des sekundären Spektrums eintritt. Für ein dünnes dreilinsiges Objektiv liegen die Verhältnisse ähnlich, man faßt zweckmäßig die Linsen mit gleichem Vorzeichen zusammen. Sie mögen durch die Zeichen 1 und 2 gekennzeichnet sein. Dann kann man setzen

$$\Phi = \varphi_1 + \varphi_2, \quad \frac{\Phi}{N} = \frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2}, \quad \frac{\partial \Phi}{N} = \frac{\partial_1 \varphi_1}{\nu_1} + \frac{\partial_2 \varphi_2}{\nu_2} \quad (56)$$

Die Gesamtwirkung der beiden Linsen in bezug auf die Farbenkorrektur ent-

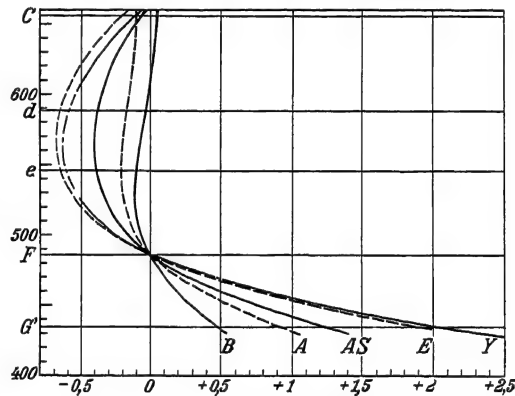


Abb 28 Die Farbenlängsabweichung von Achromaten E, Y zweilinsigen Apochromaten A, AS und einem dreilinsigen Apochromaten B ($f = 1000$)

¹ SCHEIBNER, Abh d Sachs Ges d Wiss 11, S 541 (1876)

spricht also der einer einzigen Linse mit den Werten Φ , N , Θ . Indem man φ_1 und φ_2 aus den Gleichungen fortschafft, wird

$$\frac{\Theta - \vartheta_1}{N - \nu_1} = \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{\nu_2 - \nu_1} \quad (57)$$

Der darstellende Punkt für die Ersatzlinse liegt also auf der Verbindungsgeraden der Punkte für die beiden Glasarten. Für die Hebung des sekundären Spektrums bietet so das dreilinsige System aus drei verschiedenen Glasarten keinen grundsätzlichen Vorteil. Wenn in Abb 28 die Kurve des sekundären Spektrums für die dreilinsigen Objektive B aus neuen Glasarten günstiger ist als für das zweilinsige A , so liegt dies daran, daß bei dem dreilinsigen System die Ersatzlinse für die beiden Sammellinsen ein niedrigeres ν erhalten kann, ohne daß die Krümmungen, da sie auf mehr Flächen verteilt werden, zu stark werden. Ein Objektiv mit verringertem sekundärem Spektrum nennt man wohl ein Achromaten.

Man kann nun die Frage aufwerfen, ob bei zwei getrennten dünnen Linsensystemen, die als Linsen mit beliebigem ν -Wert behandelt werden können, die Aufhebung des sekundären Spektrums auch dann möglich ist, wenn die ϑ -Werte der Glasarten der erwähnten Beziehung für gewöhnliche Silikatgläser entsprechen. Wir betrachten zu dem Zweck zunächst ein achromatisches teleskopisches System ($s_1 = s_2 = \infty$), dessen beide Glieder nicht farbenfrei sind. Verfolgt man die Strahlen durch die erste Linse in der Lichtrichtung, durch die zweite umgekehrt, so haben die Linsen einen gemeinsamen Brennpunkt sowohl für C wie für F , für F liegt er aber anders wie für C . Setzen wir nun eine kleine Farbenabweichung voraus, so ist $\varphi_1 \nu_1 + \varphi_2 \nu_2 = 0$. Es ist ferner $W s'_1 = -\vartheta_1 (\varphi_1 \nu_1)$ und für die zweite Linse rückwärts gerechnet $W s_2 = -\vartheta_2 (\varphi_2 \nu_2)$. Die Gesamtabweichung ist die Summe, drückt man sie in σ_2 aus, so ist mit φ_2^2 zu multiplizieren. Dieser Wert ist aber auch gleich $W \sigma'_2$, also unter Benutzung der Achromasiebedingung $W \sigma'_2 = (\vartheta_2 - \vartheta_1) \varphi_2 \nu_2$. Man überzeugt sich leicht, daß $W \sigma'_2$ negativ wie bei einer Sammellinse ist. Ergänzt man nun das teleskopische System zu einem Objektiv, indem man der zweiten Linse eine dünne achromatische Zusatzlinse mit Glasarten aus derselben Reihe unmittelbar auflegt, so kann man $W \sigma'_2$ nur dadurch gleich Null machen, daß man diese Zusatzlinse zerstreuend wählt, der Brennpunkt des Objektivs wird also virtuell. Wir gehen noch auf den Fall ein, daß im Brennpunkt der ersten Linse für die erste Farbe eine Linse steht, die die erste am Ort einer dritten Linse abbildet, und daß die erste und dritte Linse aus der gleichen Glasart bestehen. Es sei wieder ein kleiner Farbenbezirk vorausgesetzt. Die zweite Linse werde so geteilt, daß die Strahlen zwischen den Teilen parallel verlaufen, so daß die Brennweite der Teillinsen je gleich dem Abstände d_1 bzw. d_2 von der anderen zugekehrten Linse ist. Das erste Teilsystem besteht so aus der ersten Linse und der ersten Teillinse, das zweite aus der zweiten Teillinse und der dritten Linse. Für diese Teilsysteme, wenn das zweite rückwärts durchgerechnet wird, fallen die Brennpunkte für die erste Farbe in die Teillinsen. Außerdem ist der Farbenunterschied der Vergrößerung gehoben, wenn die Hauptstrahlen sich in dem Scheitel der ersten Linse und damit auch in dem der zweiten Linse kreuzen. Rechnet man auch für die zweite Farbe durch, und zwar für das zweite Teilsystem rückwärts, so ist im ersten Fall $V s'_2 = -1 (\varphi_1 \nu_1)$, im zweiten $V s'_2 = -d_2^2 (\varphi_2 \nu_1)$, wo d_2 gleich dem Abstand der zweiten und dritten Linse ist. Die Achromasiebedingung $\varphi_1 \varphi_2 d_2^2 = -1$ wird also unabhängig von ν , also auch für $\nu \neq \vartheta$ erfüllt, das sekundäre Spektrum für die übrigen Farben ist gehoben. Da φ_1 nur positiv sein kann, wird φ_2 und damit auch s'_2 negativ.

22 Die Arten der Farbenkorrektion Ist noch sekundäres Spektrum vorhanden, so entsteht die Frage, für welche Wellenlängen die Schnittweiten gleich-

gemacht werden sollen. Es kommt darauf an, daß das Minimum der Kurve des sekundären Spektrums auf eine bestimmte Wellenlänge fällt. Da nun die Objektive aus den gewöhnlichen Glasarten nahe übereinstimmende Farbkurven haben, ist es möglich, der Forderung dadurch zu genügen, daß man die Schnittweiten für zwei ausgewählte Wellenlängen gleichmacht. Man ist geneigt anzunehmen, daß es für die Farbenverbesserung am günstigsten ist, wenn der Scheitel der Kurve des sekundären Spektrums an der hellsten Stelle liegt, also etwa bei $0,555 \mu$, wie es auch von SCHEIBNER¹ und STREHL (Ziff 30) empfohlen wird. Dies würde der Vereinigung von C und F für das Mittel aus den Schnittweiten für die Achsen- und Randstrahlen entsprechen. Objektive für irdischen Gebrauch sind auch meist so korrigiert, während Objektive für astronomische Beobachtungen gewöhnlich so korrigiert sind, daß das Minimum mehr nach dem roten Ende des Spektrums rückt. KINGSLAKE² fand durch Versuche mit einem Objektiv von 6,4 cm Öffnung und 80 cm Brennweite, dessen chromatische Korrektion mit einer afokalen Linse (Ziff 20) verändert werden konnte, daß bei irdischen Zielen für schwachste Farbensäume das Minimum zwischen 0,49 und 0,52, dagegen für beste Definition zwischen 0,53 und 0,55 liegt, während es bei astronomischen Beobachtungen bei bester Definition zwischen 0,565 und 0,580 liegt. Dementsprechend hat man seit FRAUNHOFER, der auch schon den Hauptwert auf beste Definition legte, die astronomischen Objektive so korrigiert, daß das Minimum in der Nähe von 0,565 liegt, wie es Abb 28 zeigt, das nicht dargestellte Lick-Objektiv, bei dem B und F vereinigt sind, weicht von dem Zeiss-Objektiv E entgegengesetzt wie das Yerkes-Objektiv Y ab. Für gewöhnliche photographische Platten liegt das Maximum der Empfindlichkeit im Violett bei der Linie $H\gamma$ ($\lambda = 0,434 \mu$). Man vereinigt daher F und die violette Quecksilberlinie bei $\lambda = 0,401 \mu$ und bezeichnet dies als aktive Korrektion. Für die weniger empfindliche orthochromatische Platte in Verbindung mit einem geeigneten Filter kann auch ein für Beobachtung korrigiertes Objektiv verwendet werden. Während man diese aktive Korrektion in der Astrophotographie anwendet, wird für die gewöhnlichen Zwecke der Photographie (Portrait und Landschaft) D mit $H\gamma$ vereinigt. So wird die Mattscheibe eben da auf das scharfste Bild eingestellt, wo auch die Platte das scharfste Bild aufnimmt. Den Unterschied zwischen diesen beiden Einstellungen bezeichnet man als Fokusdifferenz, seine Ausgleichung für ein unachromatisches Objektiv ist bei der gewöhnlichen Photographie dadurch erschwert, daß bei ihm der Einstellunterschied für kleinere Distanzen sich mit diesem Abstand ändert. Beim astrophotographischen Objektiv kann er dagegen leicht berücksichtigt werden. Die schlechtere Vereinigung der chemisch wirksamen Strahlen hat für die gewöhnliche Photographie geringere Bedeutung, da die Brennweiten kleiner sind. In Abb 29 sind auch die Kurven des sekundären Spektrums für diese anderen Arten der Korrektion eingezeichnet.

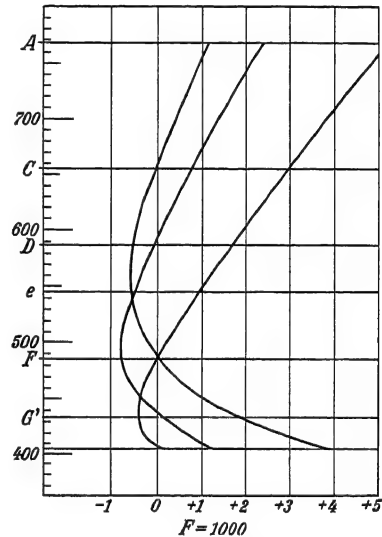


Abb 29 Das sekundäre Spektrum bei verschiedenen Arten der Farbenkorrektion

¹ Abh d Sachs Ges d Wiss 11, S 541 (1876)

² Trans Opt Soc 28, S 73 (1926/7)

23 Die Änderung der Bildfehler mit der Farbe Gegenüber den Farbenfehlern des Bildortes und der Bildgröße hat die Änderung der Bildfehler mit der Farbe beim Fernrohr geringere Bedeutung. Ist die sphärische Abweichung für Rot gehoben, so besteht für ein gewöhnliches Fernrohrobjektiv eine nach dem blauen Ende des Spektrums zunehmende Überverbesserung, bei parallel einfallendem Strahlenbündel ändert sich die Farbenlangsabweichung mit dem Abstand des einfallenden Strahles von der Achse im Sinne der Überverbesserung. Vom Standpunkt der geometrischen Optik mußte man die engsten Einschnürungen für C und F zusammenlegen. Das richtige Ergebnis liefert aber erst die Beugungstheorie (Ziff 32), nach der bei zonenfreier sphärischer Abweichung die beste Einstellung in der Mitte zwischen Achsen- und Randschnittpunkt liegt. Sie steht auch in Übereinstimmung mit der in der rechnenden Optik üblichen Korrektur, daß die Farbenlangsabweichungen für Achsen- und Randstrahl gleich und entgegengesetzt gemacht werden. Schon D'ALEMBERT¹ hat auf diesen Fehler, die Farbenabweichung (chromatische Differenz) der sphärischen Abweichung hingewiesen. Dieser Fehler hat beim Fernrohrobjektiv geringere Bedeutung. Die Farbenabweichung der Verzeichnung kommt bei Okularen in Betracht, man kann sie auch als eine Änderung der Farbenabweichung der Bildgröße mit dem Abstand des Bildpunktes von der Achse ansehen. Man wird daher diese Farbenabweichung nicht für die auf Grund der GAUSS'schen Theorie berechnete Bildgröße heben, sondern für eine mittlere Zone des Gesichtsfeldes. Wenn der Dingpunkt sich von dem Rand nach der Achse bewegt, sollte die Breite des Spektrums, in die der Bildpunkt ausgezogen wird, in einer mittleren Zone den entgegengesetzten Wert wie am Rande annehmen. Wenn die Schärfe des Bildes am Rande unvollkommen ist, wird man hier auch wohl einen größeren Fehler zulassen.

24 Die Öffnungsblende Für die Untersuchung der Abbildung von Punkten außer der Achse wurde angenommen, daß sich die Hauptstrahlen an einer bestimmten Stelle der Achse kreuzen und daß eine kreisförmige Blende an dieser Stelle die Strahlenbündel begrenzt. Im allgemeinen können für diese Begrenzung sowohl die Innenränder der Linsenfassungen wie besondere Blenden in Betracht kommen. Beide werden im folgenden als Blenden zusammengefaßt und sollen

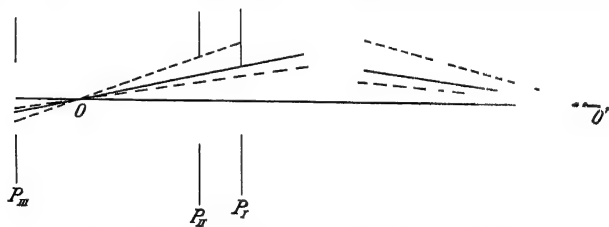


Abb 30 Die Ermittlung der Öffnungsblende

als zur Achse ausgerichtete und senkrechte Kreisöffnungen vorausgesetzt werden. Die Behandlung anderer Öffnungen kann nach denselben Grundsätzen erfolgen. Gehen Strahlen von einem Dingpunkt O in der Achse eines ausgerichteten Systems von Umdrehungsflächen aus und verfolgt man ein Strahlenbündel von genügender Öffnung, so wird dies durch eine der Blenden P am meisten beschränkt, wenn man von dem Grenzfall absieht, daß einige Blenden den gleichen Teil aussondern (Abb 30). Die am meisten einschränkende Blende P_r bezeichnet man als Öffnungsblende. Zuweilen kann man sie dadurch erkennen, daß man das

¹ Opusc math, III Art, S 742 Paris 1761/8

Auge in den Ding- bzw Bildpunkt bringt. Die Öffnungsblende begrenzt dann das beleuchtete Feld. Ist die Öffnungsblende von dem beobachtenden Auge durch Teile des abbildenden Systems getrennt, so sieht das Auge nur ein Bild der Öffnung. Das so im Ding- bzw Bildraum entstandene Bild der Öffnungsblende Bl nennt man die Eintritts- bzw Austrittspupille PP bzw $P'P'$ (Abb 31). Es möge auch angenommen werden, daß für Punkte außer der Achse in der Dingebene weder eine andere Öffnungsblende die Strahlen begrenzt, noch eine erhebliche Änderung der Lage und Größe der Austrittspupille in Betracht kommt, wie sie dadurch entstehen kann, daß für die Abbildung der Öffnungsblende nun andere Strahlen, nämlich die durch die enge Öffnung um den Dingpunkt

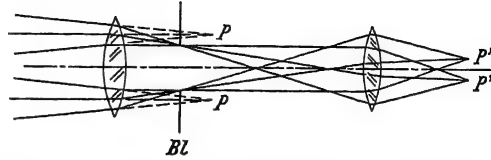


Abb 31 Die Eintrittspupille PP und die Austrittspupille $P'P'$ als Bilder der Öffnungsblende Bl

außer der Achse, maßgebend sind. Auch für etwas größeren oder kleineren Dingabstand soll dieselbe Öffnungsblende wirksam sein. Die Mitte dieser Öffnungsblende bestimmt nun den Kreuzungspunkt der Hauptstrahlen, durch die jedenfalls bei enger Öffnung die Abbildung festgelegt ist. Die durchgelassenen Hauptstrahlen größter Neigung begrenzen das Gesichtsfeld, die dingseitigen das dingseitige oder wahre (objektive), die bildseitigen das bildseitige oder scheinbare (subjektive) Gesichtsfeld. Die Blende, durch deren Rand sie gehen, ist die Gesichtsfeldblende, ihr Bild im Ding- bzw Bildraum die Eintritts- bzw Austrittsluke.

Den Abbildungsvorgang stellt man sich in der folgenden Weise vor. Die Stellen des Dingraums, die überhaupt zur Abbildung gelangen, sind die, die von der Eintrittspupille aus unverdeckt erscheinen, sie bilden eine, wenn auch vielfach unregelmäßige und unstetige Bildfläche, abgesehen von Sonderfällen, wie der Abbildung der unendlich fernen Ebene des gestirnten Himmels. Das Bild der Dingfläche fällt mit dem Auffangschirm im Bildraum nur stellenweise zusammen. Es wird aber durch die Hauptstrahlen in die Auffangfläche projiziert. Statt nun so vorzugehen, ist es oft übersichtlicher, die Dingpunkte mit den Hauptstrahlen im Dingraum auf die unendlich ferne Ebene zu projizieren. Diese Projektion ist nichts anderes, als eine Zentralprojektion von der Eintrittspupille aus. Sie gibt das Bild, wie es dem Auge am Ort der Eintrittspupille erscheint. Die so festgelegten Hauptstrahlen bestimmen auf dem Auffangschirm ein größeres oder kleineres Bild, wobei noch Verzeichnung eintreten kann.

25 Die Abbildungstiefe Die Punkte der unregelmäßigen Dingfläche können nun auch bei vollkommener Abbildung durch das System nicht gleichzeitig auf dem Auffangschirm vollkommen scharf abgebildet werden, dies wurde nur für die Punkte der dem Auffangschirm zugeordneten Dingfläche, der Einstellfläche, zutreffen. Andere werden nur mit Zerstreuungskreisen abgebildet. Man kann nun die Dingfläche Punkt für Punkt in den Bildraum abbilden, durch die Austrittspupille und die Dingpunkte sind dann die abbildenden Buschel bestimmt, und ihr Schnitt mit dem Auffangschirm gibt den Zerstreuungskreis. Eine bessere Übersicht erhält man meist, wenn man die Zerstreuungskreise feststellt, die die Strahlenbündel im Dingraum in der Einstellfläche ausschneiden. Diese Bündel sind durch die Dingpunkte und die Eintrittspupille bestimmt. Bildet man nun diese Zerstreuungskreise auf dem Auffangschirm ab, so hat man das gleiche Ergebnis. Die Gesamtheit der Zerstreuungskreise in der Einstellfläche bzw auf dem Auffangschirm bezeichnet man als Abbild bzw Abbildskopie.

Bezeichnet man den Halbmesser der Eintrittspupille bzw des Zerstreuungskreises mit p bzw z , den Abstand der Dingpunktebene bzw der Einstellebene von der Eintrittspupille mit ξ bzw ξ_e , so ist (Abb 32)

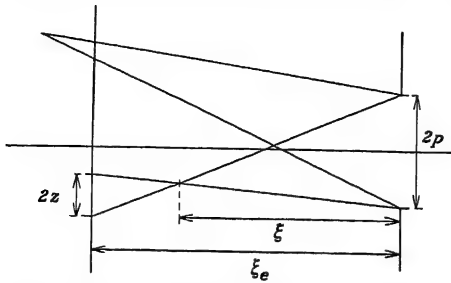


Abb 32 Der Zerstreuungskreis eines nicht-eingestellten Punktes

$$z = \frac{(\xi_e - \xi)p}{\xi}, \quad (58)$$

$$\frac{z}{\xi_e} = p \left(\frac{1}{\xi} - \frac{1}{\xi_e} \right) \quad (59)$$

Ist man so imstande, die Größe der Zerstreuungskreise zu bestimmen, und sieht man einen gewissen Durchmesser $z' = \beta z$ des Zerstreuungskreises auf dem Auffangschirm als Grenze für einen scharfen Bildpunkt an, so kann man weiter errechnen, bis zu welcher Grenze in der Tiefe des Raumes die

scharfe Abbildung reicht. Der Abstand der vorderen Grenze von der Eintrittspupille sei ξ_v , der der hinteren ξ_h . Setzt man diese Größen in (59) ein und bildet unter Beachtung, daß z in beiden Fällen entgegengesetztes Vorzeichen hat, die Summe und den Unterschied der so erhaltenen Gleichungen, so ergibt sich

$$\frac{2}{\xi_e} = \frac{1}{\xi_h} + \frac{1}{\xi_v}, \quad (60)$$

$$\frac{2z}{p \xi_e} = \frac{1}{\xi_h} - \frac{1}{\xi_v} = T_D \quad (61)$$

Die Tiefe T_D ist hier in Dioptrien zu messen (S 93), in diesem Maß liegt die vordere und hintere Grenze gleich weit von der Einstellebene. Beim Fernrohr ist der zulässige Zerstreuungskreis $z' = \xi'_e = \Gamma z \xi_e$ im Winkelmaß gegeben. Ist dieser $1'$, die Vergrößerung $\Gamma = 6$, der halbe Objektdurchmesser $p = 10$ mm, so ist $T_D = 0,0048$ Dpt, wenn die hintere Grenze im Unendlichen liegt, ist die vordere bei 210 m.

b) Das Bild als Beugungserscheinung¹

26 Das Beugungsbild eines Lichtpunktes Für ein volles Verständnis der optischen Abbildung muß die wellenformige Ausbreitung des Lichtes berücksichtigt werden. Es möge zunächst angenommen werden, daß die abbildende Linsenfolge so beschaffen ist, daß die optischen Weglängen von dem Dingpunkt zum zugehörigen Bildpunkt gleich sind, also nach der früheren Ausdrucksweise die Strahlen wieder streng in einem Bildpunkt vereinigt werden, und daß eine achsensenkrechte Ebene wieder als solche abgebildet wird. Ferner wird zunächst angenommen, daß die Dingpunkte selbstleuchtend sind. Nach der Lehre von der Beugung wird die Lichtverteilung hinter der Öffnungsblende gefunden, indem man durch diese Blende eine Zwischenfläche legt und die Interferenzwirkung der von den Elementen dieser Fläche innerhalb der Blende ausgehenden Elementarwellen für den Bildraum bestimmt. Den einzelnen Punkt, für den man die Interferenzwirkung errechnet, nennt man den Aufpunkt. Die Zwischenfläche legt man zweckmäßig so, daß ihre Elemente auf den Lichtwegen nahe senkrecht stehen, es ist dies möglich, da in den vorkommenden Fällen die Hellig-

¹ STREHL, Theorie d. Fernrohrs auf Grund der Beugung des Lichts. Leipzig: Barth 1894, Centr. Z. f. Opt. u. Mech. 28, S. 1 (1907), 41, S. 409 (1920), 47, S. 264 (1926), 48, S. 1 (1927), JENTZSCH, im Handbuch d. Physik von GEIGER u. SCHEEL Bd. 18, S. 255. Berlin: Julius Springer 1927, PICH, Optische Abbildung. Die Wissenschaft Bd. 84. Braunschweig: Vieweg 1931.

keit des Beugungsbildes mit dem Abstand von dem leuchtenden Bildpunkt rasch abnimmt und so die Richtungsunterschiede der Lichtwege vom Element der Zwischenfläche zum Bildpunkt und Aufpunkt gering sind. Der Bildpunkt sei O' , die Austrittspupille begrenzt die Kugelwelle. Die Verbindungslinie der Mitte der Austrittspupille P' mit dem Punkt O' sei die eine Koordinatenachse, der Abstand des Aufpunktes von der achsensenkrechten Ebene in O' , die als Brennebene bezeichnet werde, sei p , die Lage des Aufpunktes sei weiter durch den seitlichen Abstand σ von dieser Achse und den Polarwinkel $\omega = 0$ in der achsensenkrechten Ebene gekennzeichnet. Die Öffnung sei ein Kreis um P' mit dem Halbmesser p' , die Lage eines Punktes in der Öffnung sei durch r, ω gegeben. Wir setzen $P'O' = \xi'$, dann ist die Beleuchtungsstärke im Aufpunkt, wenn sie in der Öffnung $= 1$ gesetzt wird,

$$B = \frac{C^2 + S^2}{\lambda^2 \xi'^2}, \quad (62)$$

$$C = \int_0^p \int_0^{2\pi} \cos \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{r\sigma \cos \omega}{\xi'} + \frac{p r^2}{2 \xi'^2} \right) r dr d\omega, \quad (63)$$

$$S = \int_0^{p'} \int_0^{2\pi} \sin \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{r\sigma \cos \omega}{\xi'} + \frac{p r^2}{2 \xi'^2} \right) r dr d\omega \quad (64)$$

Der Klammerausdruck stellt die Weglängenabweichung dar. Der Faktor $1/\lambda^2 \xi'^2$ ergibt sich aus dem Energieprinzip, da die Lichtverteilung in einer achsensenkrechten Ebene von der Größe $\mathcal{J} = \frac{2\pi p' \sigma}{\lambda \xi'}$ abhängt, ebenso setzen wir $\mathfrak{P} = \frac{\pi p p'^2}{\lambda \xi'^2}$.

Für $\lambda = 500 \mu\mu$ ergibt sich folgende Tabelle

$$\begin{array}{ccccccc} 2p' \xi' = & 1,5 & 1,10 & 1,20 & 1,40 & 1,80 \\ \mathcal{J} = 1, & \sigma = 0,8 & 1,6 & 3,2 & 6,4 & 12,8 \mu \\ \mathfrak{P} = 2\tau, & p = 0,1 & 0,4 & 1,6 & 6,4 & 25,6 \text{ mm} \end{array}$$

Die Schwingungsphase im Aufpunkt ist durch $\text{tg } \gamma = S/C$ gegeben. Die Beugungserscheinung einer beliebigen Öffnung in der achsensenkrechten Ebene durch O' ($p = 0$) bezeichnet man nach FRAUNHOFER, die allgemeine für andere Ebenen nach FRESNEL. Die genaue Berechnung der Lichtverteilung für den allgemeinen Fall bei kreis- und spaltförmiger Öffnung wurde von LOMMEL¹ gegeben, in der folgenden Tabelle sind die Werte nach MARTIN² aufgeführt, der die Beleuchtungs-

\mathfrak{P}	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π	$5\pi/4$	$3\pi/2$	$7\pi/4$	2π	$9\pi/4$	$5\pi/2$	$11\pi/4$	3π
0	100,0	94,93	81,02	61,51	40,51	22,15	9,00	1,94	0	1,17	3,24	4,58	4,53
$2\pi/9$	88,45	84,00	71,75	54,47	35,90	19,66	8,02	1,77	0,04	1,06	2,87	4,05	3,97
$4\pi/9$	60,08	57,10	48,90	37,40	24,98	14,04	6,17	1,80	0,47	0,98	2,01	2,84	2,77
$2\pi/3$	29,53	28,28	24,77	19,86	14,37	9,35	5,42	2,95	1,74	1,41	1,50	1,62	1,55
$8\pi/9$	8,71	8,76	8,84	8,86	8,53	7,76	6,54	5,04	3,53	2,21	1,31	0,86	0,73
$10\pi/9$	0,66	1,32	3,02	5,28	7,21	9,21	7,60	6,68	4,75	2,79	1,31	0,56	0,48
$4\pi/3$	0,42	1,08	2,83	5,11	7,08	8,13	7,94	6,66	4,74	2,80	1,32	0,56	0,48
$14\pi/9$	1,64	2,06	3,15	4,54	5,74	6,34	6,16	5,25	3,93	2,56	1,49	0,85	0,67
$16\pi/9$	1,45	1,62	2,12	2,74	3,36	3,81	3,93	3,74	3,30	2,66	2,01	1,44	1,04
2π	0,46	0,52	0,76	1,05	1,53	2,12	2,69	3,14	3,30	3,14	2,67	2,04	1,56
$20\pi/9$	0	0,04	0,23	0,49	1,00	1,69	2,40	2,84	3,49	3,45	3,01	2,29	1,13
$22\pi/9$	0,21	0,25	0,41	0,67	1,12	1,73	2,09	2,91	3,20	3,72	2,76	2,14	1,38
$8\pi/3$	0,41	0,44	0,55	0,74	1,02	1,40	1,80	2,16	2,38	2,39	2,20	1,85	1,43
$26\pi/9$	0,27	0,29	0,31	0,43	0,58	0,79	1,04	1,32	1,44	1,76	1,85	1,80	1,46
$28\pi/9$	0,04	0,05	0,05	0,12	0,21	0,36	0,57	0,89	1,24	1,57	1,83	1,94	1,79
$10\pi/3$	0,02	0,02	0,05	0,09	0,18	0,32	0,55	0,85	1,21	1,86	1,56	1,96	1,62

¹ Munch Abh. 15, S. 233 (1884)

² Trans Opt Soc 27, S. 249 (1925/6), SIEGEL, Z f Instrk 15, S. 362 (1895)

starke in $O' = 100$ setzt. Setzt man die Beleuchtung in der Austrittspupille $= 1$, so ist die in der Mitte des Beugungsscheibchens $(b'^2 \pi \lambda \xi')^2$, STREHL nennt diesen Wert den Lichtverdichtungsfaktor, den in der Tabelle aufgeführten Wert dividiert durch 100 nennt er den Interferenzfaktor I . Die Lichtverteilung ist zur achsensenklichen Ebene durch O' symmetrisch, in der Brennebene beobachtet man ein helles Scheibchen (Abb 33, Kurve I mit der Abszisse 3), umgeben von hellen Ringen mit rasch abnehmender Helligkeit, die Helligkeit in der Ringmitte

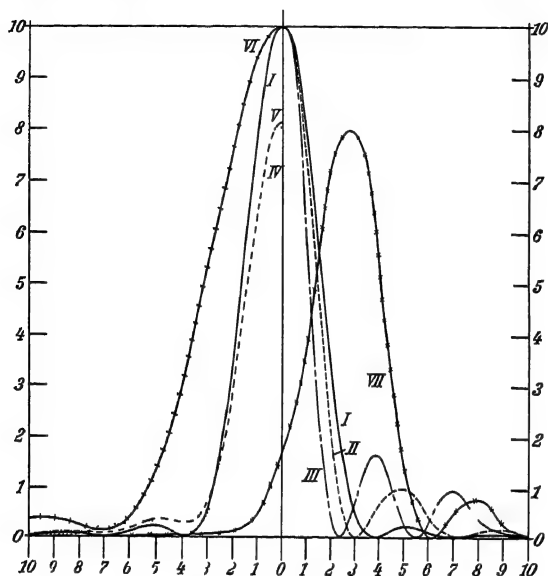


Abb 33 Die Lichtverteilung in dem Beugungsbild eines Lichtpunkts I bei kreisförmiger Öffnung, II bei Ringöffnung, III bei unendlich schmaler Randzone, IV bei abweichender Einstellung, V bei sphärischer Abweichung, VI bei Halbkreisöffnung senkrecht zum Halbtungsdurchmesser, VII bei Koma

Amplitude dargestellt, in den Abständen $\beta = 2n\pi$, wo n eine ganze Zahl ist, ist die Helligkeit Null, an diesen Stellen kehrt sich also die Lichtverteilung mit der Änderung der Einstellung um. Bei $\beta = 4\pi$ ist die Beleuchtung schon nahe gleichmäßig. Bei abweichender Einstellung hält es RAYLEIGH¹ noch für unschädlich, wenn der Unterschied zwischen der langsten und kürzesten Weglänge $\lambda/4$, die sog RAYLEIGHsche Grenze, nicht überschreitet. Geht man von einem Bildpunkt mit konstanter Weglänge zu einem um $d's'$ in der Achse entfernten über, so ist für diesen der größte Weglängenunterschied Δ durch $2\Delta = d's' \sin^2 u'$ gegeben, wo u' der halbe Öffnungswinkel ist. Die Tiefe der scharfen Abbildung wird so für $\Delta = \lambda/4$ gleich $\lambda \sin^2 u'$. Abb 33, Kurve V stellt die Lichtverteilung im Beugungsscheibchen für diese RAYLEIGHsche Grenze dar.

27 Das Auflösungsvermögen Hat man es mit zwei einander und der Achse benachbarten Lichtpunkten zu tun, so sind die Beleuchtungsstärken, die den beiden Lichtpunkten in den Punkten der Einstellenebene entsprechen, zu addieren. Fällt die Mitte des Beugungsscheibchens des einen Punktes in den dunklen Ring des anderen (Abstand der Punkte im Beugungsmaß $\beta = 3,83$), so sinkt die Beleuchtungs-

ist für den ersten bzw zweiten Ring nur 1,57 bzw 1,240 von der in der Scheibchenmitte, der erste Ring enthält nur 8%, der folgende nur 3% der Lichtmenge im mittleren Scheibchen. In der Brennebene ist die Lage des ersten dunklen Ringes durch $\beta = 3,83$ gegeben, die der weiteren durch $\beta = 7,02$ und $10,17$, die der Maxima durch $\beta = 0, 5,14, 8,42, 11,61$. Abb 34 a_1, b_1, c_1 zeigt das entsprechende Beugungsbild bei verschiedener Beleuchtung.

Nach dem Satz von HELMHOLTZ ist β für zugeordnete Punkte des Ding- und Bildraums gleich, man beobachtet also im Bildraum die Beugungserscheinung, die der Austrittspupille als beugender Öffnung entspricht. Langs der optischen Achse wird der Gang der Helligkeit ebenfalls durch eine Wellenlinie abnehmender

¹ Phil Mag 8, S 410 (1879)

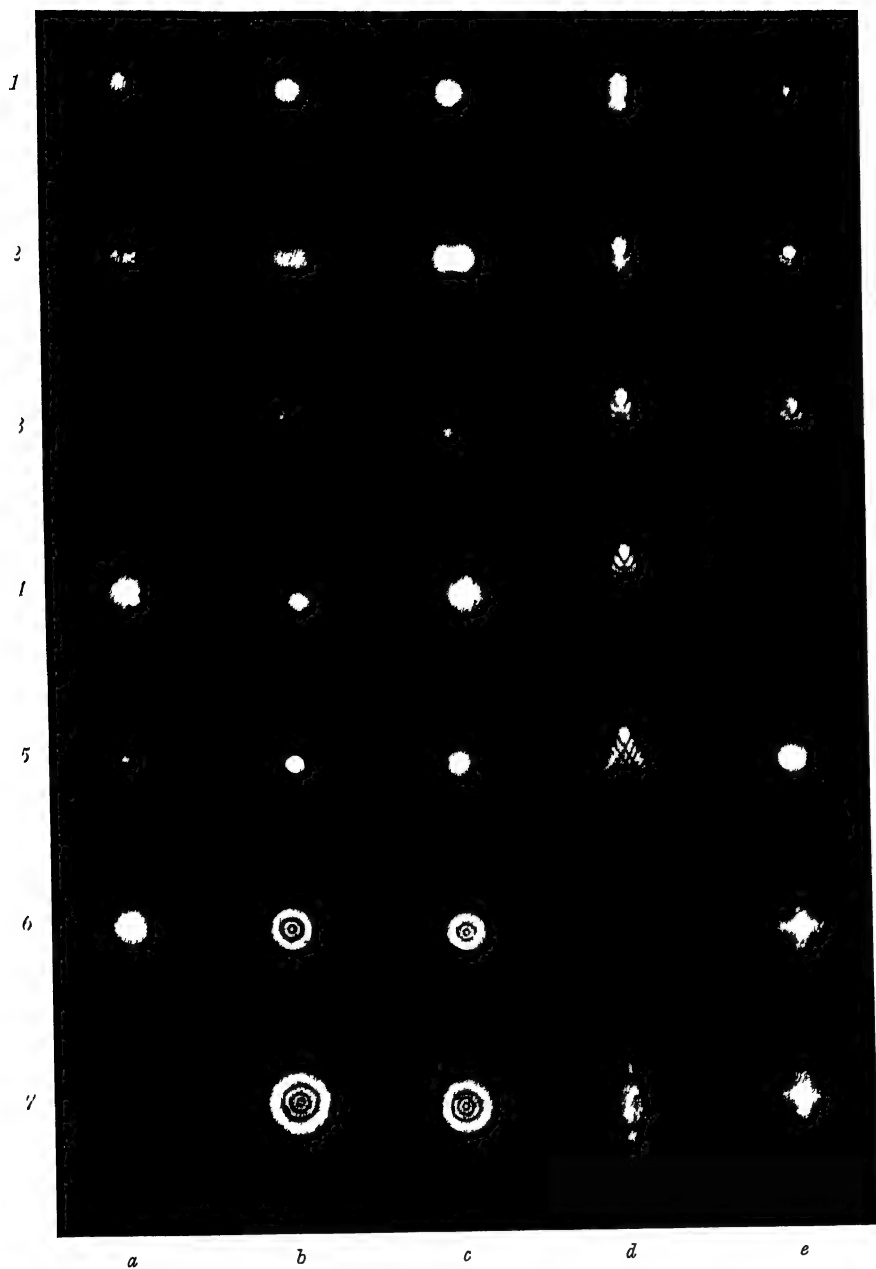


Abb 34 Aufnahmen von Beugungsbildern A eines Lichtpunkts, a) bei kreisförmiger Öffnung mit verschiedener Belichtung (a_1, b_1, c_1) b) bei Halbkreisöffnung (d_7 nach SCHEINER), c) bei sphärischer Abweichung verschiedener Größe mit verschiedener Einstellung (Reihen 3 bis 7 bis zu c nach MIS GRIFFITHS), d) bei Koma von verschiedener Stärke (e_1, e_2, e_3) und mit verschiedener Öffnung (d_1 bis d_6), e) bei Astigmatismus verschiedener Stärke (e_5, e_6, e_7), B eines Doppelsterns mit verschiedener Belichtung (a_2, b_2, c_2)

Die Aufnahmen ohne Herkunftsangabe sind wesentlich der Hilfe von Prof A KOHLER, Jena, zu verdanken

starke in der Mitte zwischen den geometrisch-optischen Bildpunkten auf 73 % der Maxima, nach RAYLEIGH¹ gilt dies meist als die Grenze für das Erkennen der Trennung der Lichtpunkte. Beim Fernrohr und photographischen Objektiv sieht man für entfernte Objekte den $\beta = 3,83$ entsprechenden Abstand dividiert durch die Brennweite als das Maß des Auflösungsvermögens für Doppelpunkte an, es ist $136''$ dividiert durch den Durchmesser D der Eintrittspupille in mm. Die Wahl von $\beta = 3,83$ ist nicht frei von Willkür, es kommt außer anderem auf die Empfindlichkeit des Auges für Helligkeitsunterschiede an. STREHL empfiehlt daher, als theoretische Grenze des Auflösungsvermögens, die freilich nicht erreicht wird, den Wert $\beta = 2,9$ anzusehen, für den der Abfall der Beleuchtungsstärke in der Mitte verschwindet, er mag als das theoretische Auflösungsvermögen bezeichnet werden. Nach MOURASHINSKY² sind für die Werte von $\beta = 3,0$ bis 4,0 in Stufen von 0,1 die Werte von I_{\min}/I_{\max} in Prozenten 99,95, 99,0, 97,0, 94,2, 91,4, 87,2, 83,2, 79,0, 73,5, 70,6, 66,5. Er findet, daß für β zwischen 3,0 und 3,8 die Maxima nicht in die geometrischen Bildpunkte fallen, sondern um so mehr nach der Mitte verschoben sind, je kleiner β ist. Abb. 35 zeigt nach ihm

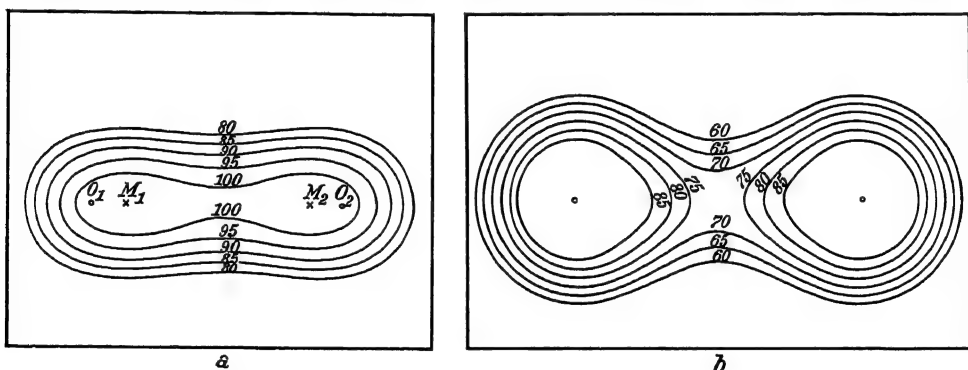


Abb. 35 Die Lichtverteilung in Schichtendarstellung bei Überlagerung zweier Beugungsscheibchen. a) für $\beta = 3,2$, b) für $\beta = 3,83$ (Auflösungsgrenze eines Doppelpunktes)

in Schichtendarstellung die Helligkeitsverteilung für die Abstände $\beta = 3,2$ und $3,83$, in der Darstellung für $\beta = 3,2$ sind O_1 und O_2 die geometrischen Orte der beiden Sterne, M_1 und M_2 die Maxima. Er gibt auch solche Darstellungen für andere Werte von β und für ungleiche Helligkeit der beiden Sterne. Abb. 34 a₂, b₂, c₂, zeigt das Beugungsbild für $\beta = 3,83$ bei verschiedener Belichtung. Es ist bisher angenommen worden, daß die beiden Lichtpunkte selbst leuchten, die ausgesandten Schwingungen inkohärent sind, sind es beleuchtete Punkte, so sind die Schwingungen kohärent, interferenzfähig, und es müssen die Lichtvektoren unter Berücksichtigung des Phasenunterschiedes zusammengesetzt werden. Bei Beleuchtung mit einer achsensenkrechten ebenen Welle ist das theoretische Auflösungsvermögen nur $\beta = 4,6$, für dunkle Punkte auf hellem Grunde gelten dieselben Werte wie für helle auf dunklem Grunde. Besonders einfach ist die mathematische Behandlung für leuchtende Gerade, wenn die Öffnung rechtwinklig und den Geraden parallel ist³. Die Helligkeitsänderung mit der zur Geraden senkrechten x -Koordinate ist in diesem Fall durch $\sin^2 \beta_x \beta_x^2$ gegeben, wo $\beta_x = (2\pi x \sin u_x) / \lambda$ und u_x der halbe Öffnungswinkel in der x -Richtung ist. Um ein Hauptmaximum gruppieren sich symmetrisch Nebenmaxima, die rasch

¹ Phil Mag 8, S. 261 (1879), 9, S. 40 (1880)

³ RAYLEIGH, Phil Mag 8, S. 261 (1879)

² Phil Mag 46, S. 29 (1923)

an Helligkeit abnehmen und die durch dunkle Streifen bei $\beta = m\pi$ getrennt sind, wo m eine ganze Zahl ist. Hat man zwei parallele Lichtlinien im Abstand Δ , so addieren sich die Helligkeiten in den betreffenden Punkten. Es ist die Helligkeit

$$I = \text{konst} \left| \left\{ \frac{\sin \beta(\tau)}{\beta(\tau)} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sin \beta(\tau - \Delta)}{\beta(\tau - \Delta)} \right\}^2 \right| \quad (65)$$

Ist $\Delta = \lambda / 2 \sin u_x$, so fallen die Stellen $\beta = \pi$ des dunklen Streifens in dem einen Beugungsbild auf das Maximum in dem anderen. Zwischen den beiden Höchstwerten liegt eine Einsenkung mit 81 % Helligkeit. Für die kreisförmige Öffnung ist die Auflösung eines Geradenpaares geringer als für die rechteckige, das theoretische Auflösungsvermögen $\beta = 2,8$ bzw. 4,2 für selbstleuchtende bzw. beleuchtete Gerade. Die Auflösung von Streifen endlicher Breite behandelt MOURASHINSKY¹. Ist die Entfernung der Lichtlinien (oder Punkte) von der Öffnung groß $= E$, so muß man zweckmäßig ihren Abstand im Winkelmaß $\Delta E = \psi = 2E \sin u_x$ ist dann die Breite der Öffnung $= B$, mithin $\psi = \lambda B / \Delta$ und ψ dienen als Maß des Trennungs-, Unterscheidungs- oder Auflösungsvermögens.

28 Der Einfluß von Abdeckung und Absorption in der Öffnung Durch Abblendung einzelner Zonen kann ein rascherer Lichtabfall in dem Beugungsscheibchen erreicht und dies so verkleinert werden, damit wird das Auflösungsvermögen erhöht², wie Abb 33, Kurve II und III für die Falle zeigt, daß die Mitte bis zum halben Durchmesser oder daß alles bis auf eine unendlich schmale Randzone abgeblendet ist. Im ersten Fall hat der erste dunkle Ring den Halbmesser $\beta = 3,15$ statt 3,83, aber die Intensität I in der Mitte des ersten hellen Rings ist auf 9,4 % gestiegen, im zweiten Fall ist $\beta = 2,4$ und $I = 16\%$. Ähnliche Wirkungen erhält man durch geringe sphärische Abweichung vom 1,5fachen der RAYLEIGHschen Grenze (Ziff 26)³. Der steilere Lichtabfall wird jedoch immer mit Verlust an Helligkeit in der Mitte des Beugungsscheibchens und Erhöhung der Helligkeit in den umgebenden Ringen erkauft, dies ist aber ein Nachteil für die Definition.

Die Beugungserscheinungen einer halbkreisförmigen Öffnung haben für das Heliometer Bedeutung⁴, die Lichtverteilung als Funktion von β in der Richtung der Halbiebungsebene ist dieselbe wie für die Kreisöffnung, senkrecht dazu ist sie durch die Kurve VI in Abb 33 gegeben, der erste dunkle Ring liegt an der Stelle des zweiten dunklen Rings bei der Kreisöffnung. Photographien des Beugungsscheibchens geben SCHEINER (in Abb 34 d, wieder gegeben) und EVERITT⁵, der auch eine Isophotendarstellung bringt.

Nimmt die Absorption eines Objektivs mit dem Quadrat des Abstands von der optischen Achse zu, so wird das Auflösungsvermögen verringert, die Definition erhöht. Ähnliche Wirkung hat die Absorption beim farbenzerstreuenden Prisma⁶.

¹ Phil Mag 47, S 1105 (1924)

² AIRY, Trans Cambridge Phil Soc 5, S 283 (1834), übers. Pogg Ann 45, S 86 (1838), Phil Mag 18, S 1 (1841), RAYLEIGH, M N 33, S 59 (1873), Encycl Brit 24, § 11 (1888), ANDRÉ, Traité d'Astronomie Stellaire Paris Gauthier-Villars 1891, STREHL, Gymn- Progr Erlangen 1898, STONEY, Obs 23, S 361 (1900), STEWARD, Phil Trans A 225, S 131, Proc Opt Convention 1926, S 776, ROY, C R 192, S 461 (1931), B S A F 45, S 424 (1934)

³ KINGSLAKE, M N 87, S 634 (1927)

⁴ BRUNS, A N 104, S 1 (1883), STRAUBEL, Diss Jena 1888, A N 139, S 225 (1896), STREHL, Z f Instrk 15, S 362 (1895), MITRA, Proc Indian Ass Cult 6, S 1 (1920)

⁵ SCHEINER u. HIRAYAMA Abh Ak Berlin Anhang 1894, EVERITT, Proc R Soc London A 83, S 302 (1910)

⁶ STRAUBEL, Verh Dsch Phys Ges 4, S 332 (1902), Phys Z 4, S 71 (1902), RLESF, Ap J 13, S 199 (1901), E. HOFFMANN, Diss Jena 1912, WURM, Z f Astrophys 2, S 133 (1931)

29 Die Abbildung von Randern¹ Um die Beleuchtung am Rande ausgedehnter leuchtender Flächen zu finden, verfährt man wie folgt. Man ersetzt das Flächenelement, für das die Beleuchtung gesucht wird, durch die Beugungserscheinung, die diesem als leuchtendem Element entspricht, und ermittelt die Lichtmenge, die in die geometrisch optische Bildgrenze fällt. Im folgenden sind die Beleuchtungsstärken für gleichmäßig helle Kreisscheiben als Funktion von β und für den Halbmesser η der Kreisscheiben im Beugungsmaß $= 6$, 4 bzw. 2 nach STREHL gegeben, der auch den Helligkeitsabfall am Rande bei Farbenabweichung untersuchte. Als Einheit $= 100$ gesetzt dient die durchschnittliche Lichtstärke des geometrisch-optischen Bildes. \mathfrak{M} entspricht

$\eta = 6$				4				2			
β	M	M	\mathfrak{M}	β	M	M	\mathfrak{M}	β	M	M	\mathfrak{M}
0	85	72	90	0	140	196	84	0	78	61	62
	96,5	93	88,5		130,5	171	84		75,5	57	59
3	111	122,5	87,5	2	107	114,5	79,5	1	69	48	52
	95	90	76		74,5	55,5	63,5		59,5	35,5	42
6	49	24	42	4	42	17,5	39	2	47,5	22,5	31
	6	0,5	11		18	3	17		34,5	12	21
9	-8	0,5	2,5	6	1	0	5	3	22	5	12,5
	-1	0	2		-4	0	2		11	1	6,5
12	4	0	1	8	-3,5	0	1,5	4	2	0	3

dem Fall, daß das Licht von den einzelnen Stellen der Kreisscheibe nicht miteinander interferiert, M^2 dem Fall, daß Interferenz eintritt. Bei Planeten nimmt STREHL an, daß sie aus einer Unzahl von Stellen mosaikartig zusammengesetzt sind, die in wechselnder Verteilung nach Amplitude, Phase und Polarisation der Schwingung, von der Farbe abgesehen, teils übereinstimmen, teils nicht übereinstimmen. M hat für den Fall Bedeutung, daß zwei benachbarte Kreisscheiben miteinander interferieren, z. B. wenn mit dem Heliummeter Kreisscheiben auf Beuñung eingestellt werden, für die Überlagerung sind die Werte mit Berücksichtigung des Vorzeichens zu addieren, ehe man die Intensität durch Quadrieren erhält. Bemerkenswert ist, daß für beleuchtete Scheiben die Helligkeit in der Mitte größer ist als nach der geometrischen Optik, ferner daß in der Mitte ein dunkler Fleck auftreten kann, wie ihn PICKERING auf einem hellen Trabanten beobachtet hat. Andererseits kann, wie $Z = 4$ zeigt, die Helligkeit in der Mitte auf den doppelten Wert des geometrisch-optischen Bildes ansteigen. Ist das Bild der Scheibe sehr groß gegen das Beugungsscheibchen, so gilt die Lichtverteilung am Rande einer hellen Halbebene. Für diese ist die Beleuchtungsstärke am geometrischen Rande gleich der Hälfte des Wertes weit innerhalb des Bildes der leuchtenden Halbebene. Die Kurve der Beleuchtung als Funktion von β verläuft symmetrisch zum geometrischen Rand, die folgende Tabelle gibt nur die Werte innerhalb dieses Randes.

β	0	2	4	6	8	10
M	50	80	100	109	106	99,5
M^2	25	64	102	118,5	112,5	99
\mathfrak{M}	50	75	89	94	95	96

¹ ANDRÉ, C. R. 82, S. 205, 607, 1191 u. 1229, 83, S. 946 (1876), J. d. Phys. 5, S. 265 u. 304 (1876), Étude de la diffraction. Diss. Paris, Comparaison des effets optiques des petits et grands instruments d'astronomie. Lyon. Assoc. typogr. 1889, Ann. École norm. 5 (1876), C. R. 83, S. 946 (1876), 94, S. 1401 (1882), Ann. École norm. 10 (1881), PFERRY, M. N. 37, S. 56 (1876), STRUVE, Mém. Acad. St. Pétersbourg 30, Nr. 8 (1882), Wied. Ann. 17, S. 1008 (1882), STREHL, Z. f. Instrum. 16, S. 257 (1896), 17, S. 301 (1897), 18, S. 43 (1898), A. N. 158, S. 91 (1902), 165, S. 51 (1904), Centr. Z. f. Opt. u. Mech. 43, S. 417 (1922), 46, S. 47 (1925), 52, S. 19 (1932), NAGAOKA, Phil. Mag. 45, S. 1 (1898), BIRCK, Diss. Göttingen 1909.

NAGAOKA¹ gibt (Abb 36) die Lichtverteilung für den Durchgang eines hellen bzw dunklen Lichtpunktes über eine helle bzw dunkle Scheibe. Diese Untersuchungen haben Bedeutung für Sternendurchgänge und für Messungen mit dem Doppelbildmikrometer, sie bilden die Grundlage für die Behandlung dieser Fragen durch die Kontrasttheorie. Nach HAMY² bewirkt ein Spalt vor dem Objektiv für die Messung von Sonnendurchmessern günstigeren Lichtabfall am Rande. Ist ε der scheinbare Halbmesser der Sonne, l die Länge und b die Breite des Spaltes und ist $m = \frac{\pi l \sin \varepsilon}{\lambda}$, $n = \frac{\pi b \sin \varepsilon}{\lambda}$, so ist die beste Form des Spaltes durch $n^2 = m/2$ gegeben. Er gibt zunächst ein Verfahren an, um durch Laboratoriumsversuche den Unterschied zwischen dem so festgestellten Sonnenrand und dem geometrischen zu erhalten. Später zeigt er, wie man aus zwei Beobachtungen mit verschiedener Spaltlänge und Feinrohrvergrößerung den geometrischen Durchmesser erhalten kann. Nach einem

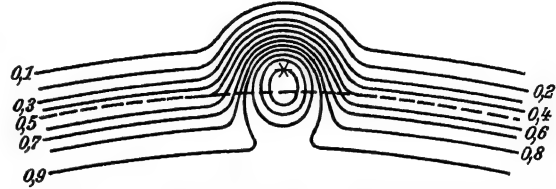


Abb 36 Die Lichtverteilung in Schichtendarstellung beim Durchgang eines Sterns

zweiten Verfahren mißt er die Sonne bei verschiedenen Durchmesser der Objektivöffnung, wobei aber die Okularbrennweite dieser Öffnung umgekehrt proportional ist, so daß die Austrittspupille bei beiden Messungen gleich ist. GROSSMANN³ findet, daß man durch Beugung an einer dunklen Lamelle bzw einem Lamellenkreuz vor dem Objektiv bei hellen Sternen die Einstellgenauigkeit erhöhen kann. STREHL⁴ behandelt auch die Wahrnehmbarkeit von hellen oder dunklen, selbstleuchtenden oder beleuchteten Punkten, Geraden oder Flächen und die Frage, bei welchem Objektivdurchmesser diese am besten wahrgenommen werden. Zum Schluß sei noch auf Bd II, 1. Hälfte dieses Handbuches Ziff 48–50, verwiesen.

30 Die Farbenabweichung Kennt man die Änderung der Lichtverteilung im Beugungsscheibchen mit der Einstellung β , so kann man den Einfluß der Farbenabweichung in der Achse einer Linse untersuchen. Es kommt ja darauf an, für die Farben, für die das Bild nicht in die Einstellenebene fällt, in dieser Ebene die Lichtverteilung zu finden, die Helligkeiten sind zu addieren. Nach STURMIL⁵ teilt man das Spektrum in kleine Wellenlangenbezirke, außer dem Faktor $P = I \lambda^2 = f(\beta)$, der von dem Abstand des Bildpunktes für den betreffenden Bezirk von der Einstellenebene abhängt, kommt es noch auf die spezifische Lichtstärke ι des betreffenden Bezirks an, wie er durch die Untersuchungen der physiologischen Optik, besonders von ARTHUR KONIG, gegeben ist. Für das Auflösungsvermögen mußte man $\iota \lambda$ nehmen, um seiner Zunahme mit abnehmendem λ Rechnung zu tragen, der Scheitel dieser Kurve liegt aber fast gleich mit dem der ι -Kurve. Die gesamte Helligkeit ist dann in dem gewählten Achsenpunkt $\sum (I_i \lambda^2)$. STREHL geht nun davon aus, daß es für das Erkennen von Einzelheiten, das Definitionsvermögen oder kurz die Definition, auf die Helligkeitsunterschiede der kleinsten, noch

¹ Ap J 51, S 73 (1920)

² C R 165, S 1082 (1917), 166, S 240 u 878 167, S 978 (1918), 169, S 821 (1919), 170, S 1143 (1920), 173, S 888 (1921), 188, S 1526 (1929), B A 1, S 197 (1920) C R 185, S 1230 (1927), 187, S 624 u 1089 (1928)

³ A N 189, S 161 (1911), KÜHL, ebenda 189, S 329 (1911)

⁴ Z f Instrk 17, S 165 (1897), A N 158, S 89 (1902), Z f Instrk 25, S 199 (1905), MICHELSON, Ap J 2, S 60 (1895), RAYLEIGH J R Micr Soc 1903, S 474

⁵ Z f Instrk 17, S 50, 77, 165 u 301 (1897), 19, S 364 (1899), 23, S 210 (1903), BUXTON, M N 85, S 78 (1924)

wahnehmbaren Einzelheiten ankommt. Er wahlte daher als Maß der Definition, auch bei Aberrationen anderer Art, das Verhältnis der Helligkeit in der Mitte des Beugungsscheibchens für das mit Aberrationen behaftete Objektiv zu dem von Aberrationen freien, er nennt diesen Wert Z den Nutzeffekt. Diese Festsetzung bietet wenigstens den Vorteil, daß dieser Wert ohne allzu große Mühe errechnet werden kann. Z hängt von F/D^2 ab. Für die einfache Linse aus gewöhnlichem Kron $n = 60$ gilt nach STREHL folgende Tabelle

F/D^2	25,6	12,8	6,4	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025
Z	99	97	91	75	48	26	13	7	3	2	1

und für das achromatische Objektiv aus gewöhnlichen Silikatgläsern

F/D^2	2,56	1,28	0,64	0,32	0,16	0,08	0,04	0,02	0,01	0,005	0,0025
Z	99	98	95	91	84	73	55	44	31	21	1

wenn F und D in mm gemessen werden. Die Kurve des sekundären Spektrums soll nach Ziff. 22 ihren Scheitel nahe an der hellsten Stelle des Spektrums haben. STREHL findet nun, daß die Definition am größten ist, wenn man auf den Scheitel der Farbenkurve einstellt, und daß eine andere Korrektur des Objektivs, bei der der Scheitel der Farbenkurve um $0,03 \mu$ gegen den Scheitel der Helligkeitskurve verrückt ist, die Definition um 20% senkt, und weiter daß bei Einstellung auf eine Ebene für den Brennpunkt der Strahlen, die gegen die im Scheitel der Farbenkurve um $0,03 \mu$ abweichen, die Definition auf die Hälfte sinkt. Dem widerspricht jedoch die leider vereinzelte Beobachtung von KELLER¹, daß man beim Lick-Refraktor das beste Bild erhält, wenn man 6,9 mm mehr nach außen einstellt. TAYLOR² stellte sich die Frage, wie groß die Dicke der Fokalschicht ist, d. h. der Schicht, die die Brennebenen von allen Strahlenarten enthält, die für die Leistung noch mitwirken. Er berücksichtigte noch Licht von einer Farbe, das in der Einstellebene keinen größeren Zerstreungskreis ergab als den doppelten des Beugungsscheibchens für die eingestellte Farbe, die Einstellebene liegt also etwa in der Mitte der Fokalschicht, um die halbe Dicke gegen den Minimalfokus verschoben. Er fand durch Versuche mit astronomischen Objektiven bis 300 mm Durchmesser, daß für solche Objektive die Dicke der Fokalschicht nur vom Öffnungsverhältnis D/F abhängt, und zwar $(F/D)^{1,6}$ proportional ist, für $D/F = 1/15$ war die Dicke 0,15 mm. Für das Lick-Objektiv findet STREHL die Definition = 48%, für ein photographisches Feinrohr $D = 250$ und $f = 2500$ mm die Definition = 55%. Bei den gebräuchlichen Öffnungsverhältnissen gewinnt man durch Verdoppelung der Brennweite um die Hälfte an Definition. Für die Definition = 75 muß nach den obigen Tabellen bei der einfachen Kronlinse $F = 3,2 D^2$, bei dem Achromaten $F = 0,081 D^2$ sein, wenn D und F in mm gemessen werden. CONRADY³ geht davon aus, daß kein Licht zwischen C und F in der Einstellebene mehr als $\lambda/2$ Gangunterschied hat, er findet so $F = 0,11 D^2$.

Durch das sekundäre Spektrum leidet weniger die Auflösung von Doppelsternen als die Definition, die für das Erkennen von Einzelheiten der Planetenoberflächen wichtig ist⁴. STREHL berechnet auch die Beleuchtung in außersaxialen Punkten der Einstellebene und findet, daß der Abfall der Helligkeit annähernd derselbe ist wie bei Farbenfreiheit.

31 Die sphärische Abweichung Die sphärische Abweichung ist vielfach behandelt worden⁵, auch strenger⁶, zugleich Koma und Astigmatismus zuerst

¹ Publ. A. S. P. 2, S. 160 (1890)

² M. N. 54, S. 67 (1893/4)

³ M. N. 65, S. 594 (1905), 79, S. 575 (1919)

⁴ STREHL, A. N. 158, S. 89 (1902)

⁵ STRAUBEL, Munch. Ak. Abh. 18 I, S. 113 (1893), WALKER, Proc. Phys. Soc. 24, S. 160 (1912), SILBERSTEIN, Phil. Mag. (6) 35, S. 30 (1918), GRIFFITHS, Trans. Opt. Soc. 21, S. 37 (1920), RICHTER, Z. f. Instrk. 45, S. 1 (1925)

⁶ BRILLOUIN, Ann. École. norm. 33, S. 17 (1916), FISCHER, Ann. d. Phys. 72, S. 353 (1923)

von STREHL¹, strenger von STEWARD und PIGHT² Für die Behandlung der sphärischen Abweichung in der Achse vom Beugungsstandpunkt muß von der entsprechenden Wellenfläche ausgegangen werden, die eine von der Kugel abweichende Umdrehungsfläche ist. Es handelt sich zunächst darum, die Abweichung dieser Fläche gegen die Kugel in ihrer Abhängigkeit von der sphärischen Abweichung darzustellen, d. h. die Wellenfläche aus den gegebenen Normalen, den Strahlen, abzuleiten.

Ist z die Koordinate eines Punktes der Wellenfläche, gerechnet von ihrem Scheitel, wobei die z -Achse in die optische Achse gelegt ist, r der Abstand dieses Punktes von der Achse, z_0 die Koordinate für einen Punkt gleichen Abstands auf der im Scheitel berührenden Kugel mit dem Radius ξ' , und wird die sphärische Langsabweichung durch $\alpha = \mathfrak{M}r^2 + \mathfrak{N}r^4$ dargestellt, so ist die Abweichung $z - z_0$ der Wellenfläche

$$z - z_0 = -\frac{\mathfrak{M}r^4}{4\xi'^2} - \frac{\mathfrak{N}r^6}{6\xi'^2} \quad (66)$$

Setzt man bei $\mathfrak{N} = 0$ die Langsabweichung für den Randstrahl, für den $r = p$ ist, gleich α_r , so ist $\mathfrak{M} = \alpha_r / p^2$, und in den Ausdrücken für C und S ist in der Klammer ein Glied $-\alpha_r r^4 / (4\xi'^2 p^2)$ hinzuzusetzen, die Bildverschlechterung ist durch

$\mathfrak{N} = \frac{\alpha_r \alpha_r p^2}{2\lambda \xi'^2}$ bestimmt. Die folgende Tabelle gibt die Definition in Prozenten für die beste Einstellebene für verschiedene \mathfrak{N} nach STREHL.

$\mathfrak{N} =$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	25
$l =$	100	99	98	95	91	87	81	76	69	63	58	28	10

Die beste Einstellebene liegt in der Mitte zwischen den Schnittpunkten der Achsen- und der Randstrahlen, während die engste Einschnürung des Strahlenbündels zwischen diesem Punkt in der Mitte und dem Randschnittpunkt liegt. Betrachtet man ein Objektiv, bei dem die sphärische Abweichung für den Rand gehoben ist und durch den zweigliedrigen Ausdruck dargestellt wird, so kann man den Zwischenfehler durch die sphärische Abweichung für $r = p/\sqrt{0,5}$ messen. Vergleicht man die Wirkung dieser Abweichung mit der einer gleichen sphärischen Abweichung $\alpha_r = \mathfrak{M}p^2$, so zeigt sich die Herabsetzung der Definition geringer. Auf Grund der RAYLEIGHschen Grenze findet man für die beste Einstellebene die zulässige sphärische Langsabweichung $\alpha_r = 4\lambda \sin^2 u'$, wobei die Definition etwa 80% ist, bei aufgehobener Langsabweichung für den Rand ist die zulässige Zonenabweichung $6\lambda \sin^2 u'$. Die Lichtverteilung im Beugungsscheibchen für den ersten Fall zeigt Abb 33, Kurve IV'. Die Aufnahmen von MIS GRIMMIGHS in Abb 34 zeigen die Veränderung der Beugungsfigur durch sphärische Abweichung, und zwar die Reihe a_5, b_5, c_5 das Beugungsscheibchen bei bester Einstellung ohne und mit einer sphärischen Unterkorrektur entsprechend λ und 2λ Gangunterschied, die Reihen $a_3, b_3, c_3, a_4, b_4, c_4, a_6, b_6, c_6, a_7, b_7, c_7$ geben die entsprechenden Bilder, wenn auf drei bzw zwei Ringe außerhalb des Brennpunkts und zwei bzw drei Ringe innerhalb des Brennpunkts eingestellt wird (s. auch Abb 104). Ist ein Farbenunterschied der sphärischen Abweichung vorhanden, so ist die chromatische Korrektur für die Zone

¹ Z f Instrk 15, S 362 (1895), 17, S 301 (1897), 19, S 364 (1899), 20, S 266 (1900), 22, S 213 (1902), 23, S 6 u 210 (1903), 24, S 322 (1904), 47, S 154 u 297 (1927), Centr Z f Opt u Mech 45, S 119 (1924), Phys Z 28, S 476 (1927), CONRADY, M N 79, S 575 (1919), Applied Optics and Optical Design, Oxford Univ Press 1929, BUXTON, M N 81, S 547 (1921), 83, S 475 (1923), Proc Opt Convention 2, S 759 (1926), MARTIN, Trans Opt Soc 26, S 63 (1921/2), 27, S 249 (1925/6).

² Ann d Phys 77, S 685 (1925), 80, S 491 (1926), Z f Instrk 50, S 308 (1930), 51, S 19, 77 u 117 (1931), Z f techn Phys 12, S 180 (1931), BORN, Naturwiss 20, S 921 (1932), STEWARD, Phil Trans A 225, S 131 (1926), Proc Opt Convention 2, S 776 (1926).

$r = p/0,5$ herbeizuführen. Der bildverschlechternde Einfluß dieses Fehlers ist früher besonders beim Fernrohr überschätzt worden. Obwohl die zweilinsigen apochromatischen Fernrohrobjektive diesen Fehler im weit größeren Maße zeigen als die achromatischen, macht er sich hier nicht störend bemerkbar, bei den Achromaten ist er daher sicher ohne Bedeutung, wie sich auch aus den Rechnungen von SIREHL ergibt.

Nach MISS CONRADY¹ tritt bei sphärischer Abweichung bis $0,7 \lambda$ Gangunterschied in der Einstellebene kein erheblicher Verlust an Auflösungsvermögen ein, wohl aber an Kontrast und Definition. Der Fokus für bestes Auflösungsvermögen fällt wahrscheinlich nicht mit dem zusammen, wo Kontrast und Definition am besten ist. Ihre Experimentaluntersuchungen über die photographische Einstellebene bei gewöhnlicher sphärischer Abweichung hatten folgendes Ergebnis: Bei kleinerer Abweichung liegt die Einstellebene übereinstimmend mit der Beugungstheorie, jenseits von $1,5 \lambda$ Gangunterschied in der besten Einstellebene bleibt sie in fester Lage zum GAUSS'schen Bildpunkt, die stärker abweichenden Strahlen bilden nur einen größeren Halo. Auch wenn auf Verschwinden des Halos eingestellt wurde, war zwar der Abstand der Einstellebene vom GAUSS'schen Bildpunkt groß, aber immer noch kleiner als der Abstand des kleinsten Zerstreuungskreises der geometrischen Optik. FLUGGE² fand, daß die Einstellebene sich dem GAUSS'schen Bildpunkt um so mehr nähert, je kleiner das schwarze Objekt ist, dies beruht wohl auch auf verschiedener Auffassung der Einstellebene. Er untersuchte besonders die Abbildung einer Kante und maß die Lichtverteilung mit dem Mikrophotometer, um die Kontrastlinien festzustellen. Erst wenn die Kontrastgrenzen so dicht beieinanderliegen, daß sie vom Auge nicht mehr getrennt werden, empfindet das Auge das Bild als scharf. Als Maß der Unschärfe sieht er daher die Breite des Flächenstückes an, das von den Kontrastlinien überdeckt wird. Er kam zu folgenden Ergebnissen: Die beste Einstellung bei gewöhnlicher sphärischer Abweichung liegt von dem GAUSS'schen Bildpunkt um den 0,62fachen Betrag der Randabweichung entfernt, dies stimmt annähernd mit CONRADY's Einstellung für die halofreie Kantenabbildung überein. Bei Zonenabweichung ist sie dort, wo sich solche Strahlen in der Achse vereinigen, für deren Eintrittshöhe $h_2^2 - h_1^2 = 0,5 h_{Rd}^2$ ist. Bei feinen Objekten nähert sich die beste Einstellung dem Umkehrpunkt der Aberrationskurve.

32 Koma, Astigmatismus und anderes. Wir gehen nun auf die Koma ein, soweit sie durch die SEIDEL'sche Theorie dargestellt wird. Mißt man sie durch den Schnittweitenunterschied t der gegenüberliegenden Randstrahlen, so ist die Größe $\mathfrak{T} = \frac{\pi t}{3\lambda} \left(\frac{p}{z'}\right)^2$ maßgebend. Für strenge Anforderungen muß nach CONRADY $\mathfrak{T} < \pi/9$ sein. Für $\mathfrak{T} = 4/3$ stellt nach STEWARD Abb 37 die Lichtverteilung in Schichtlinien dar, die gestrichelten Linien entsprechen den dunklen Ringen mit der Intensität 0. Abb 33, Kurve VII gibt diese Lichtverteilung längs dem Hauptschnitt (X-Achse von Abb 37) wieder, die Intensität I_{\max} des Maximums beträgt noch 80% der Mitte des idealen Beugungsscheibchens. Bezeichnet man in Abb 20b die Spitze der Zerstreuungsfigur mit G und den nächsten Punkt des größten, d. h. dem Rande der Öffnung entsprechenden Zerstreuungskreises mit H, die Stelle von I_{\max} mit M, so ist in diesem Fall $GM = \frac{2}{3} GH$, für $\mathfrak{T} = 4$ wird $GM = \frac{1}{2} GH$, das Maximum rückt nach der Spitze. Abb 34 zeigt das Beugungsbild der Koma von verschiedener 1 bis 3facher Stärke (e_1, e_2, e_3) und bei verschiedener Öffnung von 1/1500 bis 1/4000 (d_1 bis d_5), e_1 ist gleich $1/9$, d_1

¹ Proc Opt Convention 2, S 830 (1926)

² Z f Instrk 46, S 333 (1926)

Für den Astigmatismus ist $\Omega = \frac{\pi q}{\lambda} \left(\frac{p}{z'} \right)^2$ maßgebend, wo q der Unterschied der Schnittweiten für das sagittale und das tangentielle Buschel ist, wenn man die Lichtverteilung auf der einen Seite der Mittelebene zwischen den Brennebenen um 90° dreht, wird die ganze zu dieser Mittelebene symmetrisch. Im Beugungsscheibchen in der Mittelebene ist für $\Omega = 1$ die Beleuchtung in den Durchmessern parallel den Brennnlinien am größten und nimmt gleichmäßig nach den ihren Winkel halbierenden Durchmessern ab. Für $\Omega = 1,4$ zerfällt der Ring in vier helle Bogen, zwischen ihnen und dem Scheibchen sinkt die Helligkeit nicht mehr auf Null herab. Für $\Omega = 2,5$ verschmelzen die Bogen mit dem Scheibchen, es erscheint ein helles Kreuz, langs dessen Armen die Helligkeit allmählich abnimmt, in den Winkelhalbierenden bemerkt man vier schwache Lichtpunkte, die Reste des zweiten Beugungsings (OUDER hält auf Grund praktischer Versuche $\Omega = 1,14$ für zulässig. Abb 34 e_5, e_6, e_7 zeigt das Beugungsbild für Astigmatismus verschiedener Stärke ($1, 2, 2\frac{3}{4}$) bei Einstellung auf die Mitte der Brennweite.

Den Einfluß von Luftschlieren behandelt STREHL¹, indem er annimmt, daß die Wellenfläche sinusförmig zylindrisch verbogen ist, und zwar um $\lambda/6$ bei einer Länge des Bogens von 100 mm. Er findet, daß die Definition bei größeren Objektiven nahe konstant auf etwa 55% herabgesetzt wird.

SIREIL behandelt auch den Einfluß kombinierter Aberrationen². Es ist oben gezeigt worden, daß das Auflösungsvermögen von selbstleuchtenden und beleuchteten Gegenständen verschieden ist. Bei Beobachtungen mit dem Mikroskop hat man es nun fast durchweg mit beleuchteten Gegenständen zu tun. Für diese Verhältnisse hat ABBE³ seine Theorie der Bilderzeugung beim Mikroskop entwickelt, diese Theorie wurde von STONEY⁴ auf die Beobachtung von Planetenoberflächen mit dem Fernrohr übertragen, STREHL neigt zu der Ansicht, daß deren Abbildung in der Mitte der von beleuchteten und der von selbstleuchtenden Gegenständen steht. MANDELSTAM⁵ hat gezeigt, daß in vielen Fällen die Abbildung die gleiche ist, ob man es mit selbstleuchtenden oder mit beleuchteten Gegenständen zu tun hat. Endlich sei auf bisher noch nicht erwähnte Photographien von Beugungserscheinungen hingewiesen⁶.

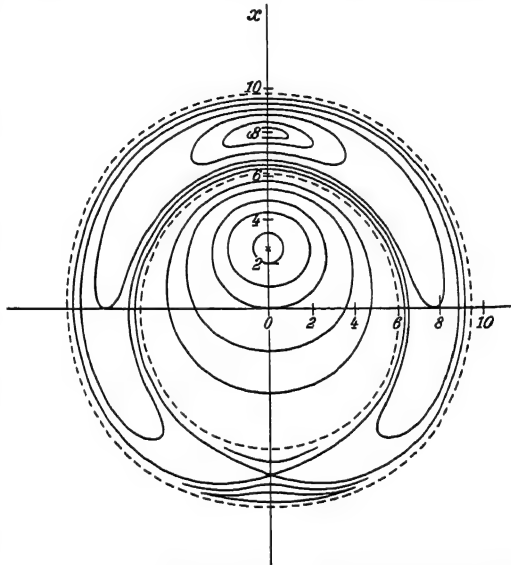


Abb 37 Die Lichtverteilung in Schichtendarstellung bei Koma

¹ Z. Instr. 22, S 213 (1902), WADSWORTH, Ap J 7, S 70 (1898)

² STREHL, Centr. Z. Opt. u. Mech. 41, S 21 (1920)

³ Schultzes Arch. f. mikr. Anat. 9, S 469 (1873), LUMMER u. REICHE, Die Lehre v. d. Bildentstehung im Mikroskop. Braunschweig Vieweg 1910

⁴ Phil. Mag. (6) 16, S 318 (1908), VORHIES, Ap J 40, S 311 (1914)

⁵ Ann. d. Phys. 35, S 881 (1911), LAUE, ebenda 43, 165 (1914)

⁶ ARKADIEW, Phys. Z. 14, S 832 (1913), RAMAN, Phys. Rev. 13, S 259 (1919), WILBERFORCE, Phil. Mag. 13, S 154 (1932)

c) Der Bau des Fernrohrs

33 Die Vergrößerung des Fernrohrs Als die Grundformen der praktisch in Betracht kommenden Fernrohre kann man Systeme von brechenden und spiegelnden Umdrehungsflächen ansehen, die parallele Strahlen wieder als parallele austreten lassen, sog. teleskopische Systeme, deren Besonderheiten in der Abbildungslehre Ziff 11 behandelt sind. Auch wenn Bild- und Dingabstand nicht unendlich sind, kann man durch Zusatzlinsen in der Eintritts- und Austrittspupille das System in ein teleskopisches verwandeln, ohne den Gang der Hauptstrahlen und die Öffnung der abbildenden Bündel zu ändern. Von dieser Erwägung ausgehend, soll hier bei der Behandlung des Fernrohrs zunächst ein teleskopisches System vorausgesetzt und erst im Anschluß daran der Fall des endlichen Ding- und Bildabstands behandelt werden. Es möge mit den Linsenfernrohren begonnen werden. Da die dicke Linse mit der Brennweite ∞ als Fernrohr keine praktische Bedeutung hat, so besteht die einfachste Art des Fernrohrs aus zwei getrennten Linsen, von denen die vordere als Objektiv, die hintere als Okular bezeichnet wird. Wir beschränken uns zunächst auf die GAUSSISCHE Abbildung. Wie aus Abb 17 hervorgeht, verhält sich der Durchmesser des austretenden Parallelstrahlenbündels zu dem des eintretenden, wie die Brennweite des Okulars f zu der des Objektivs F , wenn man die Gleichung (32) für die Brennweite auf Objektiv und Okular anwendet. Dies Verhältnis gilt nach dem früheren überhaupt für die Quervergrößerung B , die Vergrößerung von Strecken in achsensenkrechten Dingen, unabhängig vom Dingabstand, der umgekehrte, mit F bezeichnete Wert gilt für das Konvergenzverhältnis, die Winkelvergrößerung, insbesondere die der Hauptstrahlneigung gegen die Achse. Diesen Wert bezeichnet man hier als die Fernrohrvergrößerung. Sie ist also von der Lage der Eintrittspupille unabhängig. Liegt sie in der hinteren Hauptebene des Objektivs, so folgt allein aus der Abbildung des Okulars, daß, wie schon festgestellt, $F = -F/f$ ist. Die Fernrohrvergrößerung gibt an, in welchem Verhältnis der Winkel, unter dem der Gegenstand dem Auge durch das Fernrohr erscheint, gegenüber dem Winkel, unter dem er dem freien Auge erscheint, vergrößert ist. Da man gewöhnlich mit dem Fernrohr weit entfernte Gegenstände beobachtet, so kann der Winkel, unter dem der Gegenstand von der Eintrittspupille erscheint, gleich dem Winkel, unter dem der Gegenstand mit freiem Auge erscheint, gesetzt werden. Man kann so F als das Maß der wirklichen Vergrößerung des Fernrohrs ansehen. Ausnahmsweise, etwa, wenn bei physikalischen Messungen mit einem besonders langen Fernrohr mit kleinem Dingabstand gearbeitet wird, ist es aber nötig, auf die ursprüngliche Bedeutung der Vergrößerung als des Verhältnisses der Sehwinkel zurückzugehen. Infolge der Vergrößerung des Sehwinkels erscheint der Gegenstand nähergerückt. Dies hat aber nichts damit zu tun, in welcher Entfernung das Bild durch das Fernrohr entworfen wird. Der Eindruck für das Auge ist bei gleichem Bildwinkel derselbe, ob nun das Bild, wie hier zunächst angenommen wird, im Unendlichen liegt oder ob es für ein fehlsichtiges Auge in anderer endlicher Entfernung entworfen wird, da die Akkommodation dem Auge keinen Anhalt für die Entfernung gibt.

Wie schon erwähnt, ist die Vergrößerung auch das Verhältnis des Durchmessers des Querschnitts des eintretenden parallelen Strahlenbündels zu dem Durchmesser des austretenden. Man kann sie also messen, wenn man feststellt, wieviel Male das Bild eines Maßstabes, das das Fernrohr hinter dem Okular entwirft, kleiner ist als dieser Maßstab selbst. Hat man es bei näherem Ziel oder bei fehlsichtigen Augen mit keinen Parallelbuscheln zu tun, so kann man nur messen, wieviel Male die Austrittspupille kleiner ist als die Eintrittspupille. Um

die Forderung paralleler Bündel nicht genau erfüllen zu müssen, wird man auch sonst die Querschnitte der Bündel in der Nähe dieser Pupillen messen. Die abgeleiteten Beziehungen sind nun auf dem Boden der GAUSS'schen Theorie gefunden, sie gelten daher nicht uneingeschränkt für endliche Öffnungen und Hauptstrahlneigungen. Die Vergrößerung des Fernrohrs als die Winkelvergrößerung für kleine Hauptstrahlneigungen in den Pupillen festzulegen, erscheint aber allgemein zweckmäßig, da Einzelheiten am besten mit dem Fernrohr erkannt werden, wenn man es mit seiner Achse auf den Gegenstand richtet, da ja die Bildfehler in der Achse am geringsten sind. Im allgemeinen wird man nun vom Fernrohr eine treue, von Verzeichnung freie Wiedergabe verlangen. Nach (43) muß dann $y' \xi \gamma \xi'$ konstant gleich der Fernrohrvergrößerung in der Achse sein, da ja $\Delta p'$ gegen ξ' und Δp gegen ξ im allgemeinen vernachlässigt werden kann. Für größere Gegenstände wird man also $\tan w' / \tan w$ als die Vergrößerung ansehen, und dies bei der unmittelbaren Messung benutzen, wenn nötig aber nachträglich die Verzeichnung berücksichtigen.

34 Die Helligkeit des Fernrohrs Für die Helligkeit des Fernrohrs ist einerseits der Querschnitt der vom Auge aufgenommenen Strahlen, andererseits die Leuchtkraft (Intensität) der Strahlen maßgebend. Man gibt die Helligkeit als das Verhältnis zur Helligkeit des mit freiem Auge gesehenen Gegenstandes an. Die Leuchtkraft der Strahlen wird nun beim Durchgang durch das Fernrohr vermindert. Erstens findet an jeder Grenzfläche zwischen Glas und Luft ein Reflexionsverlust statt, bei einer Fläche und senkrechtem Durchtritt ist das

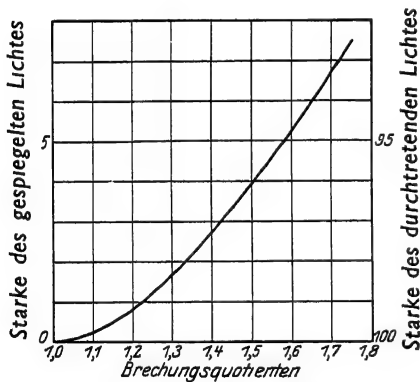


Abb 38 Der Spiegelungsverlust in Prozenten bei senkrechtem Einfall für verschiedene Brechungsquotienten

Verhältnis des zurückgeworfenen zum einfallenden Licht $R = (n-1)^2 / (n+1)^2$,

also ist für $n = 1,5$ der Reflexionsverlust 4%. Bei zehn Flächen ist er $1 - (1 - R)^{10}$ und steigt für $n = 1,5$ auf 33,5%. Abb 38 stellt den Spiegelungsverlust an einer Fläche für verschiedene Brechzahlen dar. Mit größerem Einfallswinkel wird das Licht polarisiert, d. h. der Verlust ist für die in der Einfallsebene und die senkrecht zu ihr polarisierten Anteile verschieden, Abb 39 stellt in Abhängigkeit vom Einfallswinkel ($n = 1,5$) den Verlust für die Anteile (—) und für das ganze Licht (---) dar. Mit größerem Einfallswinkel nimmt der Reflexionsverlust zu, bis $i = 45^\circ$ ist aber die Zunahme noch klein. Zur Verminderung dieses Reflexionsverlustes werden die Linsen, wo es angeht, miteinander verkittet, da der Re-

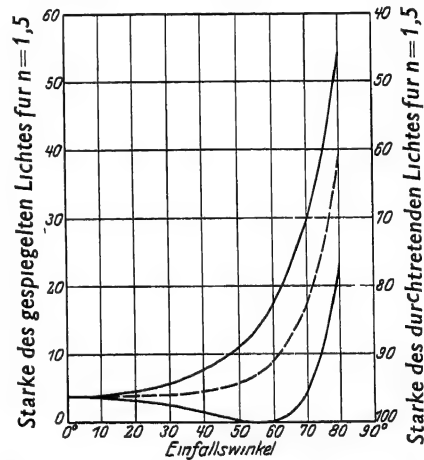


Abb 39 Der Spiegelungsverlust in Prozenten an der Oberfläche eines Glases mit $n = 1,5$ für das ganze Licht (---) und für die senkrecht zueinander polarisierten Anteile (—)

flexionsverlust an der Kittfläche praktisch Null ist. Zweitens tritt eine Schwächung der Leuchtkraft durch Absorptionsverlust im Glase ein, dieser kann je nach der Wellenlänge des Lichtes erheblich verschieden sein, so ist er verschieden für photographische Systeme und für Beobachtungssysteme, namentlich bei Flintglas nimmt die Absorption nach dem blauen Ende des Spektrums rasch zu. Ist der Durchlassigkeitsfaktor für eine Schicht von 1 cm a , so ist er für eine Schicht von d cm gleich a^d .

Bei verminderter Helligkeit erweitert sich die Pupille des Auges etwas, dies reicht aber bei weitem nicht aus, um den Verlust durch Reflexion oder Absorption im Fernrohr auszugleichen. Praktisch hat meist die Augenpupille beim Sehen mit dem Fernrohr dieselbe Größe wie ohne. Da also der Querschnitt der Bündel im ersten Falle nicht größer sein kann, kann das Fernrohr nur Bilder von verminderter Helligkeit zeigen, soweit es sich um Gegenstände von endlicher Flächenwinkelgröße handelt. Eine Vergrößerung der Austrittspupille über die Größe der Augenpupille hinaus bringt keine Steigerung der Helligkeit. Sie hat nur den Vorteil, daß auch bei seitlicher Abweichung von der richtigen Augenhaltung noch die ganze Augenpupille mit Licht erfüllt wird. Ist umgekehrt die Austrittspupille des Fernrohrs m mal kleiner als die Augenpupille, so wird die Helligkeit im Verhältnis m^2 herabgesetzt. Die Vergrößerung Γ_0 , bei der die Austrittspupille gleich der Augenpupille ist, bezeichnet man als Normalvergrößerung. Der Durchmesser der Augenpupille ist bei Tageslicht (für 10000 MK Feldhelligkeit) 2,1 mm, dagegen in der Dämmerung (für 0,0001 MK) 7,3 mm. Während also bei Tageslicht ein Fernrohr noch mit der Austrittspupille von etwa 2 mm Durchmesser die größtmögliche Helligkeit bieten kann, wird es in der Dämmerung nur noch etwa den 12. Teil der Helligkeit eines gleichartigen Fernrohrs mit 7 mm Austrittspupille zeigen. Bei der Normalvergrößerung nimmt das Fernrohr von der Flächeneinheit des Gegenstandes Γ_0^2 mal mehr Licht auf als das Auge unmittelbar, diese Lichtmenge wird aber auf eine Γ_0^2 mal größere entsprechende Fläche des Bildes ausgebreitet. Die Lichtstärke des Fernrohrs ist daher der Fläche seiner Austrittspupille proportional. Als Einheit wählt man gewöhnlich die Austrittspupille mit einem Kreis von 1 mm Durchmesser. Diese geometrische Lichtstärke ist noch mit dem Durchlassigkeitsfaktor zu multiplizieren, um die Lichtstärke des Fernrohrs zu erhalten. Bei Fernrohren gleicher Art kennzeichnet die geometrische Lichtstärke die Leistung des Fernrohrs genügend. Ein lichtstarkes Fernrohr kann seine Überlegenheit nur bei schwacher Beleuchtung zeigen, bei kleiner Augenpupille leistet es nicht mehr als ein solches, dessen Austrittspupille der Augenpupille gleichkommt.

Wenn ein Gegenstand von endlicher Winkelgröße durch ein Fernrohr mit der Durchlassigkeit 1 dem Auge vergrößert geboten wird, so muß, damit das größere Bild ebenso hell erscheint, im Verhältnis Γ^2 mehr Licht aufgenommen werden, d. h. die Austrittspupille muß ebenso groß wie die Augenpupille $\Gamma = \Gamma_0$ sein, wie schon hervorgehoben wurde. Anders liegt der Fall, wenn die Winkelgröße des Bildes so klein ist, daß es dem Auge punktförmig erscheint. Eine kleine Lichtquelle auf dunklem Grunde erscheint ja in kleinerer Entfernung heller als in größerer, obwohl die Leuchtkraft der Strahlen dieselbe ist, es wird nur ein größerer Öffnungswinkel vom Auge aufgenommen. Man wird so erwarten, daß die Bilder von Sternen durch das Fernrohr in dem Verhältnis heller erscheinen, wie die Fläche der Eintrittspupille größer ist als die der Austrittspupille, wenn nur die Augenpupille alle Strahlen aufnimmt. Wenn ein Stern n ter Größe mit einem Objektiv von dem Durchmesser D_n erkannt wird, so braucht man für

einen m ten Größe ein Objektiv mit dem Durchmesser $D_m = D_n q^{\frac{m-n}{2}}$, wo q das

Verhältnis der Lichtstärke aufeinanderfolgender Größenklassen ist, vorausgesetzt ist, daß die Leistung eines solchen Objektivs voll in Wirkung tritt. Ein Fernrohr mit m mal so großer Eintrittspupille wird also den Stern noch in der m fachen Entfernung sichtbar machen. Nach KUHL¹ gilt dies auch noch, wenn bei Übervergrößerung das Beugungsscheibchen in erheblicher Winkelgröße sichtbar wird. Er erklärt dies auf Grund des folgenden Gesetzes von RICCO. Ist p_0 der Halbmesser der Augenpupille, ι , die eben merkliche Leuchtkraft des Gegenstandes und w der Sehwinkel, so ist nach diesem Gesetz das Produkt $\iota, p_0^2 w^2$ konstant. Es gilt nach KUHL noch, wenn 900 Zapfen erregt werden. Damit ein Stern sichtbar wird, muß die Beleuchtungsstärke B' des flachenhaften Sternbildes sich von dem Hintergrund um einen kleinen Bruchteil von etwa 1 %, bei schwacher Beleuchtung um das Mehrfache von diesem Wert 1 unterscheiden. Der von dem Stern aufgenommene Lichtstrom ist nun der Fläche der Eintrittspupille πp^2 proportional, die Helligkeit des Himmelsgrundes als einer ausgedehnten Fläche ist nach dem Obigen $\pi p'^2$ proportional, wenn p' der Halbmesser der Austrittspupille und diese kleiner als die Augenpupille ist, wie es bei Sternbeobachtung der Fall ist. Außerdem wird noch der Himmelsgrund durch das Eigenlicht der Netzhaut aufgehellte. Dieses Licht setzt KUHL πp_0^2 proportional, wo p_0 der Halbmesser der Augenpupille ist. Ist I , die Leuchtkraft des eben sichtbaren Sterns, k_y bzw. k_s die Leuchtkraft des Himmels bzw. des Eigenlichts, so ergibt sich

$$\frac{I, p^2}{k_y p'^2 + k_s p_0^2} = \text{konst} \quad (67)$$

oder nach Einführung von $\Gamma = p/p'$, $\Gamma_0 = p/p_0$ und $I_{s,\infty}$ gleich dem Wert von I , für $k_y = 0$, wo der Nachthimmel völlig dunkel ist,

$$I_s = I_{s,\infty} \left(1 - \frac{k_y}{k_s} \frac{\Gamma_0^2}{\Gamma^2} \right) \quad (68)$$

Mit der Übervergrößerung nimmt der Schwellenwert I_s ab, die Sichtbarkeit wird erhöht, da die Helligkeit des Himmelsgrundes herabgesetzt wird.

HERSCHEL² erwähnt, daß er mit seinem Spiegelfernrohr von 300 mm Öffnung die Uhr an einem entfernten Kirchturm bei Nacht ablesen konnte, während sie mit freiem Auge überhaupt nicht zu sehen war. Beobachtet man bei Nacht mit einem Fernrohr, dessen Pupille der des Auges genügend nahe kommt, so hat man den Eindruck einer Steigerung der Helligkeit, obwohl sie infolge der Reflexions- und Absorptionsverluste erheblich herabgesetzt ist. GUMINOW³ erklärt dies dadurch, daß bei kleinem Sehwinkel der Reizschwellenwert für das vergrößerte Netzhautbild kleiner ist und daher eine kleinere Bildhelligkeit die Auslösung eines genügenden Reizes bewirkt. Es kommt wohl auch in Betracht, daß für das Erkennen von Formen die Unschärfe infolge der Aberrationen des Auges bei starkerer Vergrößerung weniger stört.

Was die photographische Helligkeit von Lichtpunkten oder von Sternen betrifft, so muß auf die Größe des Beugungsscheibchens zurückgegangen werden⁴. Für $\lambda = 430 \mu\mu$ ist die Größe im Winkelmaß $\delta_0 = 216'',4/D$, linear $d_0 = 0,00105 F/D$, wobei in mm gemessen wird. Die Beleuchtungsstärke in dem Scheibchen ist, wenn γ einen Faktor bezeichnet,

$$B = \gamma \frac{D^2}{d_0^2} = \gamma D^4 \quad (69)$$

¹ Sirius 51, S. 101 (1918)

² Phil. Trans. 90, S. 67 (1800)

³ Z. f. techn. Phys. 2, S. 245 (1921)

⁴ v. OPPOLZER, Wiener Ak. Ber. 116, IIa, S. 1151 (1907)

Da d_0 bei maßigem Öffnungsverhältnis die Korngröße übertrifft, wird B auch für die photographische Wirkung maßgebend sein. Wirken noch andere Ursachen proportional F verbreiternd auf das Lichtscheibchen, so ist

$$d = d_0 + mF = \frac{0,00105 F}{D} \left(1 + \frac{mD}{0,00105} \right), \quad (70)$$

$$B = \frac{\gamma}{0,00105^3} \frac{D^4}{F^3} \left(1 + \frac{mD}{0,00105} \right)^2 = \gamma \frac{D^4}{F^3} (0,00105 + mD)^2 \quad (71)$$

Es kommt also für die photographische Wiedergabe auch der lichtschwächeren Sterne nicht nur auf den Objektivdurchmesser, sondern auch auf das Öffnungsverhältnis an. Der Vorteil des großen Öffnungsverhältnisses zeigte sich bei den Aufnahmen mit weit geöffneten Hohlspiegeln durch SCHAEßERLL¹ ($D = 33$ cm, $F = 51$ cm), VOGEL² ($D = 44$ cm, $F = 92,7$ cm) und OPPOLZER³ ($D = 40$ cm, $F = 100$ cm) und mit besonders lichtstarken Objektiven (GUTHNICK und PRAGER⁴).

35 Das Auflösungsvermögen Es ist oben Ziff 27 die Abhängigkeit des Auflösungsvermögens vom Objektivdurchmesser begründet worden. Man prüft es bei kleineren Fernrohren am besten durch Gitter (Ziff 62), weil bei Doppelsternen schon die semmelförmige Gestalt als Trennung angesehen werden kann. Bereits HERSCHEL⁵ untersuchte den Einfluß des Objektivdurchmessers auf die Größe des Sternbildes und die Auflösung. Für Gitter fand FOUCAULT⁶ mit maßig starken astronomischen Fernrohren den theoretischen Wert $\psi = 1,22 \lambda / D = 138'' / D$, RAYLEIGH⁷ mit schwächeren Fernrohren für rechteckige Öffnung $\psi = \lambda / D$, für kreisförmige $\psi = 1,1 \lambda / D$, NOERZLI⁸ für $D = 1$ bis 54 mm $\psi = [(77/D) + 2]''$, er beobachtete mit dem STAMPFERSchen Gitter, D ist immer in mm gerechnet. DAWES⁹ gab auf Grund seiner Beobachtungen von Doppelsternen für mittlere Luftverhältnisse an $\psi = 116'' / D$. Ungünstig ist es, wenn ein schwacher Begleiter in den ersten hellen Ring fällt, um ihn auf eine dunkle Stelle zu bringen, half sich DAWES, indem er die Öffnung verkleinerte oder die Objektivlinsen dezentrierte, BARNARD¹⁰ benutzte eine um die Achse drehbare sechseckige Blende vor dem Objektiv. Für die Trennung heller Doppelsterne kann auch Abdecken der Mitte des Objektivs von Vorteil sein (Ziff 28), nach STEINHEIL¹¹ ist bei hellen Doppelsternen ein Rauchglas von Vorteil. Ein gutes Auge vermag bei nicht zu starker und nicht zu schwacher Beleuchtung einen Doppelpunkt bzw. eine Doppelinie mit $1'$ Winkelabstand zu trennen. Um das Auflösungsvermögen des Fernrohrs auszunutzen, braucht man eine Vergrößerung gleich dem Objektivdurchmesser in mm, man nennt sie die nützliche oder forderliche Vergrößerung. Um bequemer zu sehen, wendet man aber bis vierfache Übervergrößerung an, HUYGENS¹² gibt in seiner Fernrohrtabelle Vergrößerungen gleich dem 1,4fachen des Durchmessers in mm an. LEWIS¹³ gibt eine Tabelle über die Vergrößerungen, die verschiedene gute Doppelsteinbeobachter benutzten, er leitet daraus für $D > 80$ ab, daß eine Vergrößerung $V = 28/D$ zweckmäßig ist. Je starker nämlich die Vergrößerung ist, um so mehr macht sich die Luftunruhe störend bemerkbar. Aus einer weiteren Tabelle¹⁴ findet er für das Auflösungsvermögen $122'' / D$, wenn die beiden Sterne nahe gleich hell

¹ Ap J 23, S 109 (1903)

² Berl Ak Ber 17, S 332, Ap J 23, S 370 (1906)

³ Wiener Ak Ber 116, IIa, S 1151 (1907)

⁴ Berl Ak Ber 21, S 275 (1926)

⁵ Phil Trans 76, S 500 (1786), 95, S 31 (1805)

⁶ Ann Obs Paris, Mem 5 (1858)

⁷ Phil Mag 10, S 116 (1880)

⁸ Diss Zurich, Ost Z f Vermess 13, S 26, Auszug in Z f Instik 35, S 65 (1915)

⁹ Mem R A S 8, S 63 (1835), 35, S 154 (1867)

¹⁰ A N 182, S 13 (1909)

¹¹ A N 64, S 205 (1865)

¹² Op reliqu II, S 158. Amstelodami Jansson-Waesberg 1728

¹³ Obs 36, S 423 (1913)

¹⁴ LEWIS, Obs 37, S 372 (1914)

von der Großenklasse 5,7 und 6,4 sind, $216'' D$, wenn die Großen 8,5 und 9,1 sind, $419'' D$, wenn sie 6,2 und 9,5 sind, $914'' D$, wenn sie 4,7 und 10,4 sind PICKERING¹ gibt eine Skala für die Luftverhältnisse Die Szintillation untersuchten besonders EXNER², RAYLEIGH³, BIGOURDAN⁴ und GALLISSOT⁵, DOUGLASS⁶ zeigte, wie die Form der Sternbilder von der Größe der Luftwellen und der Objektivöffnung abhängt (siehe auch Ziff 32), über atmosphärische Störungen siehe PEASE und COUDER⁷ Bei mittleren Luftverhältnissen ist in unserer Gegend schon bei etwa 150 mm Objektdurchmesser das Szintillationsscheibchen ebenso groß wie das Beugungsscheibchen Für die Beobachtung von Planeten wird man unter günstigen Bedingungen selten mehr als eine Objektivöffnung von 300 mm ausnutzen können STREAVENSON⁸ behandelt die Abhängigkeit der erkennbaren Sterngrößen vom Objektdurchmesser Mit dem Yerkes-Fernrohr wird noch die Größe 16,75 erkannt KRITZINGER⁹ gibt als Formel für die eben noch erkennbare Größenklasse $M = 2,2 + 5 \log D$ (D in mm), ANDRÉ setzt $M = 0,07 + 5 \log D$ Bei Tage kann man nach ELLISON¹⁰ mit einem Funfzoller noch die Sterne der dritten Größe erkennen, wenn der Abstand von der Sonne groß und die Luft klar ist, eine starke Vergrößerung benutzt wird und gut scharf eingestellt ist (man stellt am besten auf Venus ein) Mit dem Lick-Fernrohr von 96 cm Öffnung wird noch eine Trennung von $0,13''$ erreicht und von $0,1''$ angedeutet, mit dem Lembang-Fernrohr von 60 cm wird $0,25''$ gemessen und $0,15''$ erkannt¹¹

Für irdische Beobachtung wird bei dunstiger Luft ein Nikol¹² oder auch ein Farbglas empfohlen GHEURY¹³ bemerkt, daß das Erkennen von lichtschwachen Nebeln durch Bewegen des Fernrohrs erleichtert wird (Über Refraktion im Rohre, insbesondere infolge einseitiger Erwärmung siehe COUDER und RENTON¹⁴) Wenn bei einem 12 cm langen Rohre die Luft auf der einen Seite einen Grad warmer ist, ist bei parallelem Strahlengang nach RAYLEIGH¹⁵ der Unterschied der optischen Weglängen erst $\lambda/4$ und daher für die Bildgüte noch unschädlich LANGLEY¹⁶ empfiehlt Durchmischen der Luft

Auch die photographische Platte vermag je nach ihrer Art nur Einzelheiten bis zu einer gewissen Feinheit wiederzugeben, je feiner sie wiedergibt, um so unempfindlicher ist sie aber meist Auf die verwickelten Verhältnisse für das Auflösungsvermögen kann hier nicht eingegangen werden, es sei auf das Buch von ROSS¹⁷ verwiesen, doch kommen für die Astrophotographie nur hochempfindliche Platten in Betracht, da die Verbreiterung der Bildscheibchen hauptsächlich durch Fehler des Objektivs infolge von Verbiegung und Mangeln des Glases, durch Luftunruhe und durch ungenaues Nachführen des Leitfernrohres bedingt ist

36 Die Einteilung der Fernrohre Damit eine vergrößernde Wirkung, wie sie fast durchweg erstrebt wird, zustande kommt, muß der absolute Wert von

¹ A N 129, S 97 (1892)

² Wiener Ak Ber 84, S 1038 (1881), 110, S 73 (1901), Ap J 21, S 368 (1905), BANLÉ u VILLIGER, Wiener Ber 111, S 1265 (1902), 113, S 1019 (1904)

³ Astron u Astrophys 12, S 834 (1893) ⁴ C R 160, S 415, 536 u 579 (1915)

⁵ C R 179, S 459 (1924) ⁶ Pop Astr 5, S 65 (1897/8), 6, S 193 (1898)

⁷ PEASE, Publ A S P 36, S 191 (1924), COUDER, BA 7, S 304 (1932)

⁸ J B A A 25, S 186 (1915), 26, S 302 (1916)

⁹ SIRIUS 49, S 13 (1916), ANDRÉ, Traité d'Astronomie Stellaire, S 113 Paris Gauthier-Villars 1899

¹⁰ J B A A 26, S 227 (1916)

¹¹ VOÛTE, Ann d Bosscha Sternw Lembang 4, 1 Teil (1932)

¹² POHL, Dinglers J 111, S 96 (1849) ¹³ Nature 91, S 86 (1913)

¹⁴ RENTON, Nature 63 S 334 (1901) COUDER, BA 7, S 305 (1932)

¹⁵ Encycl Brit 24 (1888), Scientific Papers 3, S 102, WADSWORTH, Ap J 16, S 292 (1902)

¹⁶ Am J of Science 15, S 89 (1903)

¹⁷ The Physics of the Developed Photographic Image New York Nostrand Co 1924

$f > 1$ sein, d. h. die Objektivenbrennweite F größer als die Okularbrennweite f . Im übrigen dient als verkleinerndes Fernrohr ein vergrößerndes mit umgekehrtem Strahlengang und kann daher für die weitere Untersuchung ausscheiden. Als Fernrohr mit der Vergrößerung 1 verwendet man zwei gegeneinandergestellte gleiche Okulare. Für das vergrößernde Fernrohr aus zwei dünnen Linsen muß f positiv sein, es sind dann die beiden Fälle zu unterscheiden, daß f positiv oder negativ ist. Der erste Fall entspricht dem des astronomischen (Himmels-, KEPLERSchen) Fernrohrs, der zweite dem des holländischen (GALILEISchen) Fernrohrs. Beim ersten ist f negativ und dementsprechend das Bild umgekehrt, während es beim zweiten aufrecht ist. Objektiv und Okular bestehen nun meist aus mehreren Linsen, damit eine ausreichende Bildgüte erzielt wird. Zum Objektiv rechnet man zweckmäßig die vorderen Linsen bis zu der Stelle, wo sich der Querschnitt des achsenparallelen einfallenden Bündels etwa bis auf die Größe der Austrittspupille zusammengezogen hat. Versteht man nun unter einem einfachen sammelnden bzw. zerstreuenden Linsensystem ein solches, das positive bzw. negative Brennweite besitzt und das bei dem Strahlengang des Fernrohrs zwischen seinen Linsen kein reelles Bild entwirft, das gegen das letzte Bild umgekehrt ist (ein Bild zwischen den Linsen wird z. B. bei dem Okular nach HUYGENS [Ziff 45] entworfen), so kann man das astronomische Fernrohr dadurch kennzeichnen, daß sowohl Objektiv wie Okular einfache sammelnde Linsensysteme sind, während beim holländischen Fernrohr das Okular ein einfaches zerstreues ist, beim Erdfernrohr wird dagegen zwischen den Linsen ein gegen das letzte Bild umgekehrtes Bild entworfen. Das holländische Fernrohr ist auch dadurch von den anderen Linsenfernrohren verschieden, daß bei ihm kein reelles Bild innerhalb des Fernrohrs entsteht, ein Fadenkreuz also unmittelbar nicht angebracht werden kann. Man kann es daher als Fernrohr ohne Innenbild den anderen Linsenfernrohren mit Innenbild gegenüberstellen, die ohne weiteres als Meßfernrohre eingerichtet werden können.

37 Zur Geschichte des Fernrohrs Als Erfinder des Fernrohrs gilt nach VAN SWINDENS¹ Untersuchungen J. LIPPERSHEY, das von DE WAARD² dagegen Vorgebrachte scheint mir nicht ausreichend. Jedenfalls hat LIPPERSHEY am 5. Oktober 1608 den Generalstaaten ein Fernrohr vorgelegt und erhielt 300 Gulden, auf Verlangen lieferte er am 15. Dezember ein binokulares Fernrohr und am 13. Februar 1609 noch zwei weitere solche und erhielt im ganzen 900 Gulden, die Linsen waren aus Bergkristall. Das nachgesuchte Patent wurde ihm allerdings am 15. Dezember 1608 verweigert, da verschiedene andere von der Erfindung Kenntnis hatten. Inzwischen hatte nämlich J. ADRIAENSZON, genannt MEERTS, ein Fernrohr eingereicht, von dem noch Verbesserung gewünscht, aber nicht geleistet wurde, und das mit 100 Gulden bezahlt wurde. Auch der älteste Bericht in dem Werk von SIRTURUS³ vom Jahre 1618 nennt LIPPERSHEY als Erfinder. Als GALILEI Kunde von der holländischen Erfindung erhielt, baute er ebenfalls solche Fernrohre. Das zweite Fernrohr, mit dem er 1609 die Signorie von Venedig die Aussicht vom Markusturm bewundern ließ, war 60 cm lang, hatte 40 mm Durchmesser und 9fache Vergrößerung, es bestand aus einer plankonvexen und einer plankonkaven Linse⁴. KEPLER⁵ gab 1611 das nach ihm benannte

¹ Nieuwe Verh. I. Kl. Nederl. Institut 1831, 3. Teil, S. 103, OLBIERS, Schumachers Jahrb. 1843, S. 57, DOBERCK, Obs. 2, S. 364 (1879).

² De uitvinding der verrekijkers. s'Gravenhage. Smits 1906, Favaro, Atti Ist. Veneto 66, S. 4 (1906/7).

³ Telescopium. Frankfurt. Jennis 1618. Auszug übersetzt v. ROHR, Dtsch. opt. Woch. 9, S. 396 (1923).

⁴ Favaro, Nuovo Arch. Veneto 1, S. 55 (1891), Atti Ist. Veneto 60, S. 317 (1900/1).

⁵ Dioptrice. Augsburg 1611, Ostwalds Klass. 144, S. 48 u. 51.

astronomische Fernrohr wie auch das terrestrische an. Es wurde zuerst von SCHEINER¹ ausgeführt, aber erst als Mitte der 40er Jahre SCHYRLE VON RHEYDT, nach dem das terrestrische Fernrohr auch als RHEITASches Fernrohr bezeichnet wird, Optiker, besonders WIESEL in Augsburg, zur Herstellung veranlaßte, fanden diese Fernrohre Verbreitung, dann aber rasch, da man den Vorteil des größeren Gesichtsfeldes gegenüber dem holländischen, besonders bei den starken Vergrößerungen für astronomische Zwecke, zu würdigen wußte. Für ein SCHYRLESches Erdfernrohr gibt ZAHN² folgende Biennweiten: Objektiv 93 cm, einfach vergrößernde Umkehrlinse 7 cm, Okular 6,2 cm, ähnlich sind die eines erhaltenen Fernrohrs von COOK aus dem Jahre 1673 (Ziff 48).

Über die Geschichte des Fernrohrs siehe WILDE³, SERVUS⁴, GERLAND⁵, über die ältere Geschichte COURT, v. ROHR und BAXANDALL⁶, über die des holländischen Fernrohrs⁷, die des Erdfernrohrs⁸, die des achromatischen Objektivs und die damit zusammenhängende des optischen Glases⁹, sowie die des binokularen Fernrohrs¹⁰ v. ROHR, über die des Spiegelfernrohrs GEISSLER¹¹, KLEIN¹² und SAFARIK¹³.

38 Der Strahlengang beim astronomischen Fernrohr. Bei diesem Fernrohr ist meist die Fassung des Objektivs Öffnungsblende und zugleich Eintrittspupille, da die Gesamtdicke des Objektivs klein gegen die Brennweite zu sein pflegt, kann man die Eintrittspupille in die vordere Hauptebene des Objektivs legen. In Abb 40 ist der Strahlengang für den Fall dargestellt, daß das Objektiv O_1 ein reelles Bild vor dem Okular O_2 , entwirft und daß die Austrittspupille A , das vom Okular entworfene Bild des Objektivs, reell ist, hinter dem Okular

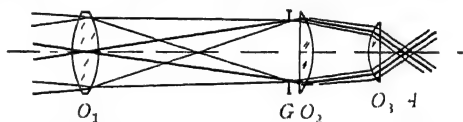


Abb 40 Der Strahlengang beim astronomischen Fernrohr

liegt. Man sieht diese Austrittspupille als hellen Kreis, wenn man mit dem Auge in den Abstand der deutlichen Sehweite vom Okular zurückgeht. In der vorderen Brennebene des Okulars ist eine Gesichtsfeldblende G angeordnet, die eine scharfe Begrenzung des Gesichtsfeldes bewirkt, da sie zugleich mit dem Bild scharf gesehen wird. Die brauchbare Größe dieser Blende ist durch die Größe der Okularlinsen und die Güte ihrer Abbildung bestimmt.

Wenn man durch das Fernrohr beobachtet, so bringt man die Mitte der Eintrittspupille des Auges zum Zusammenfallen mit der Mitte der Austrittspupille des Fernrohrs. Es bleibt dann der Hauptstrahlengang ungeändert und auch die Öffnung der Bündel, außer wenn der Durchmesser der Augenspupille nur ein Bruchteil von dem der Austrittspupille ist. In diesem Fall wird auch die Öffnung auf denselben Bruchteil beschränkt. Das Auffinden der richtigen Haltung des Auges wird durch eine Augenmuschel von entsprechender Höhe

¹ Rosa Ursina Bracciani 1630

² Oculus artificialis III, S 137 Herbigoli Heyl 1685

³ Geschichte d. Optik Berlin Rucker u. Puchlei 1843

⁴ Die Geschichte d. Fernrohrs Berlin Julius Springer 1886

⁵ Geschichte d. Physik München Oldenbourg 1913

⁶ Trans. Opt. Soc. 30, S 207 (1928/9), BAXANDALL ebenda 24, S 304 (1922/3)

⁷ v. ROHR Z. f. Instr. 37, S 65 (1917), Centr. f. Opt. u. Mech. 43, S 377 (1922), Dtsch. opt. Woch. 9, S 276 u. 396 (1923)

⁸ v. ROHR Z. f. Instr. 40, S 15 (1920), 52, S 517 (1932)

⁹ v. ROHR Z. f. Instr. 29, S 50 (1909), Dtsch. opt. Woch. 1915/6, S 369

¹⁰ v. ROHR, Die binokularen Instrumente, 2. Aufl. Berlin Julius Springer 1920

¹¹ Technische Geschichte d. reflektierenden oder Spiegelfernrohrs Dresden Waltherr 1807

¹² Centr. f. Opt. u. Mech. 2, S 121 (1881)

¹³ Centr. f. Opt. u. Mech. 15, S 207 (1894)

erleichtert, die auch das Seitenlicht abhält. Ist das Auge dem Okular zu nahe oder zu weit davon, so wird das Gesichtsfeld verringert, da die seitlichen Bündel nicht mehr in das Auge gelangen können. Dieser Fall kann bei Okularen von sehr kurzer Brennweite eintreten, wo vielfach der Abstand der Austrittspupille von der letzten Okularlinse zu klein ist, oder wenn beim Einschalten eines Zenit- oder Reversionsprismas hinter dem Okular das Auge zu weit nach hinten gedrängt wird. Je nachdem in diesem Falle die Pupille des Auges größer oder kleiner ist als die Austrittspupille, begrenzt die Austrittspupille die Öffnung und die Augenpupille das Gesichtsfeld oder umgekehrt. Wenn Augen- und Austrittspupille zusammenfallen, kann das Gesichtsfeld nur mit ruhendem Auge überblickt werden. Da aber die Schärfe nach dem Rande der Netzhaut rasch abnimmt, werden für das genauere Sehen unwillkürlich Augendrehungen zu Hilfe genommen, damit das Bild auf der Netzhautgrube, der Stelle der größten Schärfe, entsteht. Man unterscheidet diese Art des Sehens als direktes von dem indirekten mit ruhendem Auge. Der Augendrehpunkt liegt etwa $10\frac{1}{2}$ mm hinter der Pupille. Für das direkte Sehen liegt der Kreuzungspunkt der Hauptstrahlen in dem Augendrehpunkt, in den man sich die Eintrittspupille des Auges zurückgeschoben denken kann. Beim astronomischen Fernrohr ist im allgemeinen das direkte Sehen nur möglich, indem man außer der Augendrehung noch Querbewegungen des Kopfes zu Hilfe nimmt. Wollte man den Augendrehpunkt in die Austrittspupille bringen, so würde das Gesichtsfeld im indirekten Sehen beschnitten und damit die Orientierung zu sehr erschwert werden. Dem natürlichen Sehen nähert man sich um so mehr, je größer Austritts- und Augenpupille sind. Bei nicht zu großem Gesichtsfeld kann dann der Fall eintreten, daß man den Rand des Gesichtsfelds im direkten Sehen ohne Kopfbewegung wahrnehmen kann, allerdings bei beschränkter Öffnung der schiefen Bündel.

39. Das Objektiv für Beobachtung Als Objektiv benutzte man in den ersten 100 Jahren nach der Erfindung des Fernrohrs eine einfache Sammellinse. Damit die Farbenabweichung in der Achse nicht zu störend wurde, mußte man sich mit kleinem Öffnungsverhältnis begnügen. Der Durchmesser des farbigen Zerstreuungskreises in der Brennebene wurde in Ziff 20 zu $D \cdot 2\nu$ gefunden. Dieser Zerstreuungskreis erscheint durch das Okular unter dem Winkel $D \cdot 2\nu/f = D \cdot 2\nu F$. Setzt man die zulässige Größe gleich $5'$ und $\nu = 60$, so ergibt sich $F = 5,6 D$, und wenn F gleich der Normalvergrößerung D in mm gewählt wird, $F = 5,6 D^2$. Für $D = 25$ mm wird $F = 3500$. AUZOUR¹ fordert $F = 1,06 D^2$, HUYGENS² $F = 1,4 D^2$, CONRADY³ $F = 3,8 D^2$ (s. auch Ziff 30). Für etwas größere Durchmesser war man dabei genötigt, sehr lange Objektivbrennweiten zu verwenden, man ließ daher das Rohr fort, diese Luftfernrohre konnten aber nur unvollkommen mit der nötigen Genauigkeit gerichtet werden⁴ (Abb 41). Während 1655 HUYGENS noch mit einem Fernrohr von 57 mm Öffnung und 3,3 m Brennweite die Gestalt des Saturn und den Saturnmond Titan entdeckte, allerdings später auch zu Luftfernrohren überging, brauchte CASSINI ab 1671 für die Entdeckung von vier weiteren Saturnmonden CAMPANISCHE Luftfernrohre von 35' bis 136' Länge (siehe auch die Berichte⁵ über die von den Brüdern CHR u C HUYGENS sowie die von CAMPANI hergestellten Objektive und deren

¹ Phil Trans abr 1665, S 191

² Op reliqu II, S 158 Amsterdam 1728

³ J B A A 20, S 299 (1910)

⁴ HEVELIUS, Machinae coelestis pars prior Gedani 1673, HUYGENS, Œuvres complètes IV, S 227 u 433 Nijhoff La Haye, Astroscopia compendiaris, tubi optici molimine liberata Haag 1684

⁵ KLEIN, Sirius 32, S 277 (1899), SCHRODER, Centr Z f Opt u Mech 20, S 171 (1899), NIJLAND, Hemel en Dampkr 20, S 241 (1922), HUYGENS, Œuvres complètes, Voirede zu Bd XV Nijhoff La Haye 1925

Untersuchung) Bei zwei Objektiven von C HUYGENS mit etwa 200 mm Öffnung und 60 bzw 57 m Brennweite war die technische Ausführung bemerkenswert gut, die Beschaffenheit des Glases aber mangelhaft¹

Wie in Ziff 20 gezeigt wurde, läßt sich bei einem Objektiv aus zwei dünnen Linsen die Farbenlängsabweichung heben. NEWTON² hatte diese Möglichkeit veranlaßt, da er auf Grund seiner Versuche annahm, daß die Dispersion der um 1 verminderten Brechzahl proportional ist, also der μ -Wert für verschiedene Stoffe gleich sei. Achromatische Objektive ließ zuerst CHESTER MOOR HALL 1729 herstellen, und zwar bis zur Größe von 2", er hat aber über seine Erfindung nichts veröffentlicht³. So wurde diese Erfindung lange dem Optiker DOL- LOND⁴ zugeschrieben, der sich einen größeren Posten von optisch brauchbarem Flintglas gesichert hatte, das damals nur nebenbei bei der Fabrikation abfiel, und von 1758 ab Objektive in guter Beschaffenheit und größerer Zahl auf den Markt brachte. SHORT ruht die Bildgüte eines Objektivs von 95 mm Durchmesser ($f = 107$ cm, Vergrößerung 150fach) Angaben über Objektive von DOL- LONDS Bauart machen v ROHR⁵, RICHARD⁶ und BOEGEHOLD⁷.

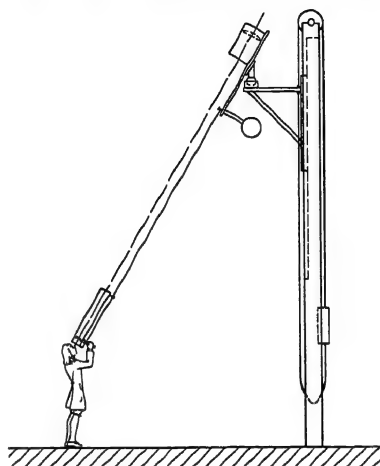


Abb 41 Die Beobachtung mit einem Luftfernrohr im 17. Jahrhundert

Bei dem zweilinsigen Objektiv können die Radien so gewählt werden, daß außer der Einhaltung einer vorgeschriebenen Brennweite und der Aufhebung der Farbenabweichung noch zwei Bedingungen erfüllt werden. Als die eine wählte man die Aufhebung der sphärischen Abweichung, erst FRAUN- HOFER, dessen Bedeutung für die Optik zu seinem 100. Todes- tage wieder gebührend hervorgehoben wurde⁸, erkannte, daß man als vierte Bedingung zweckmäßig die Aufhebung der Koma in der Nähe der Achse einführt. Die Erfüllung dieser Bedingung, die wohl auch mit seinem Namen bezeichnet wird, ist besonders wichtig, wenn mikrometrische Messungen in der Brennebene des Objektivs vorgenommen werden sollen, da dann für genaue Ein- stellung die symmetrische Form der Sternbilder nötig ist. Als Bei- spiel eines solchen Objektivs (Abb 42) seien die Daten des FRAUN- HOFERSchen Helimeterobjektivs für Königsberg⁹ ($F = 2553$, $D = 158$ mm) (Ziff 16) angeführt, bei dem wie üblich die vordere Linse aus Kron ist. Die Radien sind $r_1 = 1891$, $r_2 = -753$, $r_3 = -768$, $r_4 = -2655$ mm, die Dicken $d_1 = 13,5$ und $d_2 = 9$, die Brechzahlen $n_1 = 1,524738$, $n_2 = 1,533699$,

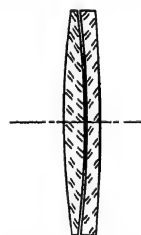


Abb 42 Das Objektiv nach FRAUNHOFER

¹ SAMPSON u CONRADY Proc R Soc Edinburgh 49 S 289 (1929)

² Optics 1 Buch, II, Prop 3 London 1729, Ostwalds Klass 96, S 83

³ PROSSER, Obs 40 S 297, Optician 53, S 203 (1917), v ROHR, Centr Z f Opt u Mech No 41 S 379 (1920), Z f Instrk 51, S 85 u 163 (1931)

⁴ Phil Trans 50 II, S 733 (1758), Engl Patent 721 (1758), Brief von SHORT, Phil Trans 55, S 54 (1863)

⁵ Z f Instrk 40, S 15 (1920), Trans Opt Soc 27, S 277 (1925/6)

⁶ Bull Soc Fr Phot 11, S 183 u 252 (1924) ⁷ Trans Opt Soc 30 S 41 (1928/9)

⁸ Naturwiss 1926, Heft 23 v ROHR, J Fraunhofers Leben, Leistungen u Wirksamkeit Leipzig Akad Verlagsges 1929

⁹ v MERZ, Munch Ak Ber 28 S 75 (1898)

$c_{n_2} = 1,630307$, $r_{n_2} = 1,648455$ Für das Objektiv der Yerkes-Sternwarte sind die entsprechenden Zahlen¹ $r_1 = -r_2 = 6950$, $r_3 = 6145$, $r_4 = 1219000$, $d_1 = 58$, $d_2 = 28$, Linsenabstand $A = 215,2$, $c_{n_1} = 1,513193$, $r_{n_1} = 1,522032$, $c_{n_2} = 1,610092$, $r_{n_2} = 1,626824$ HERSCHEL² wählte als vierte Bedingung die Hebung der sphärischen Abweichung für einen zweiten Achsendungspunkt in endlichem Abstand, diese Bauart weicht von der FRAUNHOFERSchen wenig ab

Über die Berechnung der zweilinsigen unverkitteten Fernrohrobjektive gibt es eine reiche Literatur³ Liegt die Eintrittspupille im dünnen Objektiv oder ist die Koma gehoben, so ist die Bildkrümmung ϱ , für die sagittalen Buschel bei der Brennweite 1 durch $1 + \sum (\varphi n)$ und die stärkere ϱ_t für die tangentialen Buschel durch $3 + \sum (\varphi n)$ gegeben Der Astigmatismus⁴, gemessen durch den Unterschied dieser Krümmungen, ist immer gleich 2 Für die gebräuchlichen Achromate ist annähernd $\varrho_s = -1,7$, $\varrho_t = -3,7$ Von Verzeichnung ist das gewöhnliche Fernrohrobjektiv, in dem sich die Hauptstrahlen kreuzen, praktisch frei, bei geeigneter Wahl der Glasarten können die inneren Radien gleichgemacht werden⁵, so daß die Linsen zur Verringerung des Reflexionslichtverlustes mit Kanadabalsam verkittet werden können Dies kommt jedoch nur für kleinere Öffnung bis etwa 50 mm oder wenn bei größerer Austrittspupille die Anforderungen an das Objektiv geringer sind, in Betracht, da der Kitt beim Erhärten das Objektiv verspannt⁶ Für kleinere Objektive pflegt man mit dem Öffnungsverhältnis bis etwa 1:4 zu gehen, bei 100 mm Objektivbrennweite ist die Zone der sphärischen Aberration etwa gleich 0,06 mm, die Änderung der sphärischen Abweichung mit der Farbe von C bis F etwa gleich 0,2 mm Bei größeren astronomischen Objektiven begnügt man sich mit dem Öffnungsverhältnis 1:18, damit der Einfluß des sekundären Spektrums nicht zu störend wird, CONRADY⁷ fordert $F = 0,1 D^2$ in mm (s. auch die Tabelle von STRIEHL in Ziff 30) Unter diesen Umständen sind die geringen Zonen der sphärischen Abweichung von keiner Bedeutung, und ihre Verringerung, die bei einem Objektiv aus drei Linsen möglich ist, kommt nur für Sonderfälle in Betracht

GAUSS⁸ hat eine Bauart des zweilinsigen Objektivs angegeben, bei der statt der Erfüllung der FRAUNHOFERSchen Bedingung der Farbenunterschied der

¹ Ross, Ap J 76, S 184 (1932)

² Phil Trans 1821, S 222

³ STAMPFER, Jahrb d polyt Inst Wien 13, S 30 u 52 (1828), SLIDELL, AN 35 S 301 (1853), STEINHEIL, Gott Nachr 1865, S 131, Munch Ak Ber 1867, S 284, V J 18, S 255 (1883), AN 109, S 208 (1884), MOSER, Z f Instrk 7, S 225 (1887), STEINHEIL u VOIGT, Handbuch d angewandten Optik Leipzig Teubner 1891, TAYLOR, MN 53, S 359 (1893), CHARILIER, V J 531, S 266 (1896), Z f Instrk 18, S 253 (1898), STEINHEIL, Z f Instrk 17, S 338 (1897), HERZ, AN 147, S 321 (1898), KERBER, Mechaniker 9, S 157 (1901), SIEGLER, Z f Instrk 21 S 10 (1901), HARTING, ebenda 19, S 104 (1899), 29, S 365 (1909), v ROHR, Die Bildverzeugung in optischen Instrumenten Berlin Julius Springer 1904, CONRADY, MN 65, S 594 (1905), TAYLOR, A System of Applied Optics London Macmillan 1906, STEINHEIL, Z f Instrk 26, S 84 (1906), PELLETAN, Optique appliquee Paris Berger 1910 SMITH, Nat Phys Lab Coll Res 13, S 181 (1916) Trans Opt Soc 18, S 160 (1917), Phil Mag (6) 36, S 405 (1918), Trans Opt Soc 22, S 111 (1920/1), Nat Phys Lab Coll Res 14, S 99 (1920), L'EVRIER, Trans Opt Soc 17, S 142 (1917), CHALMERS, ebenda 18, S 183 (1917), ATTLIN Phil Mag (6) 35, S 471 (1918), WOODWORTH, J Opt Soc Amer 4, S 286 (1920), SMITH, Sc Pap Bur of Stand 18, S 559 (1922/3), TARDY, Rev d'Opt 4, S 305 (1925), GARDNER, Sc Pap Bur of Stand 22, S 550 (1927)

⁴ HARTING, Z f Instrk 19, S 138 (1899), Wiener Ak Ber 108, S 1387 (1899)

⁵ MOSSOTTI, Nuova teoria d stromenti ottici Pisa Nistri 1859, HARTING, Z f Instrk 18, S 357 (1898), 20, S 230 (1900), 28, S 165 (1908), HOEGH, ebenda 19, S 37 (1899) SMITH, Nat Phys Lab Coll Res 13, S 197 (1916), CRANZ, Z f Instrk 44, S 237 (1924) MOFFITT, J Opt Soc Amer 11, S 147 (1925), MOFFITT u KASPEREIT, ebenda S 275, CHURCHILL, C R 178, S 470 (1924), H SCHULZ, Z f techn Phys 12, S 178 (1931)

⁶ EBERHARD, Z f Instrk 23, S 274 (1903)

⁷ JBAA 20, S 299 (1910)

⁸ Lindenauss Z f Astronomie 4, S 345 (1817)

sphärischen Abweichung gehoben ist. Alle Flächen sind hier nach der Dingsseite erhaben, für $F = 1000$ ($D = 77$) ist $r_1 = 116,33$, $r_2 = 345,14$, $r_3 = 143,30$, $r_4 = 95,62$, $d_1 = 6,81$, $d_2 = 2,72$, $A = 1,70$, die Brechzahlen für Rot und Violett waren zu $n_1 = 1,50435$, $n_1' = 1,52598$, $n_2 = 1,58181$, $n_2' = 1,62173$ angenommen. Die Abweichung von der FRAUNHOFERSCHEN Bedingung ist aber nicht groß, so daß die Bauart bei größeren Objektiven mit kleinem Öffnungsverhältnis für Beobachtung brauchbar ist. So sind Objektive dieser Art, auch mit Flint voraus, mehrfach mit gutem Erfolge ausgeführt worden¹, allerdings ohne daß farbenreiner Bilder erzielt wurden. Die Verringerung des sekundären Spektrums ist nach Ziff 21 nur dadurch möglich, daß es SCHOTT gelungen ist, in dem Fernrohrflint ein Glas zu schmelzen, dessen Gang der Dispersion sich dem des Kronglases mehr nähert². Da die Abweichung von dem Gang der Dispersion eines gewöhnlichen Silikatflints mit gleichem ν nur gering ist, muß der Unterschied der ν -Werte für die beiden Linsen klein sein, er beträgt nur etwa 10, während er bei den gewöhnlichen Achromaten über 20 beträgt. Dadurch ist man in dem Öffnungsverhältnis beschränkt, da sonst die Krümmungen zu stark werden. Der zweilinsige Apochromat wurde daher zunächst mit einem Öffnungsverhältnis von 1:18 (A-Objektiv von ZEISS) ausgeführt. Um das größere Öffnungsverhältnis von 1:15 zu erreichen, hat man ein wenig größere Farbenabweichung zugelassen (A5-Objektive von ZEISS)³. Mit einem dreilinsigen Objektiv, wie dem von TAYLOR⁴ (Abb 43) und dem B-Objektiv von ZEISS, läßt sich bei einem Öffnungsverhältnis von 1:15 eine nahezu völlige Aufhebung des sekundären Spektrums für Beobachtungszwecke erreichen (Abb 28). Wegen der Schwierigkeit der Herstellung größerer Glasscheiben sind diese Apochromate bisher nur in kleinen Größen bis zu 30 cm ausgeführt worden⁵. Betreffend die älteren Bemühungen der Glastechnik zur Hebung des sekundären Spektrums sei auf die Forschungen v. ROHR⁶ verwiesen. Die älteren Versuche von BAIR⁷, mit Flüssigkeitslinsen diesen Fehler zu heben, hatten nur als Anreiz für die Glastechnik Bedeutung. Zur Verminderung des sekundären Spektrums kann man bei hellen Gegenständen Filter anwenden, geeignet ist das SCHOTTSCHE Glas F 16623, noch besser sind Gelatinefilter, z. B. mit Rapidfiltergrün II der Hochster Farbwerke, Farbstoffdichte 0,5, die Durchlässigkeit ist für $0,644\mu$ 0,25, $0,578\mu$ 0,68, $0,546\mu$ 0,81, $0,480\mu$ 0,52, $0,436\mu$ 0,12, $0,405\mu$ 0,065, siehe ferner ältere Vorschläge⁸. Zum besseren Erkennen irdischer Ziele eignet sich das SCHOTTSCHE Farbglas OG 3.

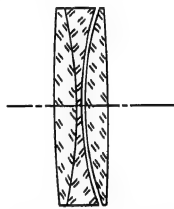


Abb 43. Das Apochromat nach TAYLOR

Als vor 100 Jahren die Herstellung größerer Flintglasscheiben außer im Benediktbeuern noch Schwierigkeit machte, wurde von BARLOW⁹ die Zerstreuungslinse mitten zwischen der Kionlinse und ihrem Brennpunkt angeordnet und von ihm als Flüssigkeitslinse ausgebildet, an dieser Stelle braucht sie nur den halben

¹ KRÜSS, / f Instrk 8, S 7 (1888)

² WOLF, V J S 33, S 261 (1898), / f Instrk 19, S 1 (1899)

³ SONNLEID, Centi / f Opt u Mech 16, S 235 (1925), SLITZ, Dtsch opt Woch 1925, S 704

⁴ M N 54, S 328 (1894), Engl Patent 17994 (1892)

⁵ Engineering 58, S 661 (1894)

⁶ Z f Instr 29, S 50 (1909), Dtsch opt Woch 1915/6, S 369

⁷ Edinburgh Trans 3 II, S 3 (1791)

⁸ MITTENZWEY, A N 106, S 45 (1883), SCHUR, / f Instrk 4, S 317 (1884), SIL u PETERS, A N 152, S 177 (1900), SALARIK, V J S 18, S 245 (1883)

⁹ Phil Trans S 105 (1828), S 33 (1829), S 9 (1831), S 1 (1833), Pogg Ann 14, S 313 (1828), Ann Chim Phys (2) 40, S 351 (1829), PRECHL, Jahrb d polyt Inst Wien 13, S 125 (1828)

Durchmesser (s auch den Bericht von HERSCHEL u a über die Leistung¹) Die Flüssigkeitslinse hat aber den Nachteil, daß bei Temperaturänderung sich die Brechung der Flüssigkeit und, was am schlimmsten ist, in den verschiedenen Teilen verschieden ändert ROGERS² verwendet zum Farbausgleich an dieser Stelle eine zweifache dünne Linse von der Brennweite ∞ (Ziff 20), die Gesamtbrennweite ist also hier gleich der der Hauptlinse, diese Objektivat hat Farbenunterschied der Vergrößerung, der aber durch sog Kompensationsokulare gehoben werden kann Solche Fernrohre wurden von PROSSL in Wien in größerer Zahl unter dem Namen Dialyt vertrieben

40 Das photographische Objektiv Die photographische Platte ist zwar etwa 10000mal unempfindlicher als das Auge, dieser Mangel kann aber durch lange Belichtung ausgeglichen werden, ja es können noch lichtschwächere Gegenstände als mit bloßem Auge entdeckt werden Die photographischen Refraktoren für die Himmelskarte von 3,4 m Brennweite und 34 cm Öffnung liefern bei einstündiger Belichtung die Sterne der 13. Größenklasse, die mit dem gleichen

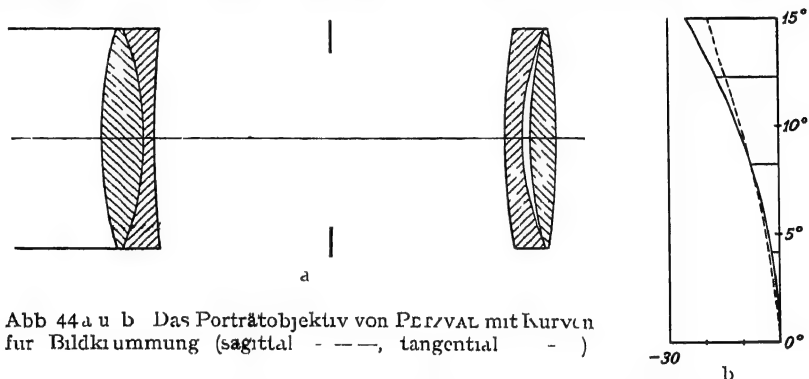


Abb 44 a u b Das Porträtobjektiv von PERVAL mit Kurven für Bildkrümmung (sagittal - - -, tangential -)

Objektiv noch eben wahrgenommen werden können Die Photographie ist aber gegen Luftunruhe empfindlicher Die Sternbilder werden dadurch verbreitert, sind aber noch rund

Je nachdem ein Objektiv für Beobachtung oder für Photographie bestimmt ist, ist es verschieden chromatisch zu korrigieren (Ziff 22) Die Radienverhältnisse werden dadurch nicht sehr geändert Durch geringe Änderung des Linsenabstandes und Umdrehen der Kronlinse hat man die Korrektur der einen Art in die der anderen verwandelt, um das Objektiv abwechselnd für beide Zwecke zu gebrauchen³ Zu dem gleichen Zweck kann eine einfache Linse auf das Objektiv aufgesteckt werden Um den Durchmesser kleiner halten zu können und so an Kosten zu sparen, hat man sie wohl zwischen Objektiv und Brennebene eingeschaltet⁴ Mit einem dünnen zweilinsigen System, einer afokalen Linse nach ROGERS², kann die Umkorrektur ohne Änderung der Gesamtbrennweite erreicht werden In diesem Falle wird aber Farbenabweichung der Vergrößerung eingeführt, um so mehr, je näher diese Linse an den Brennpunkt rückt, also je kleiner sie ist Ist die Zusatzlinse bei visuellem Gebrauch eingeschaltet, so kann dieser

¹ Proc R Soc London 3, S 245 (1833)

² Edinburgh J of Science 9, S 126 (1828) = Pogg Ann 14, S 324 (1828), SIAMPER, Jahrb d polyt Inst Wien 14, S 108 (1829), FRECHTL, ebenda 13, S 220 (1828)

³ PICKERING, Nature 36, S 562 (1887)

⁴ NEWALL, MN 54, S 373 (1894), KEELER, Ap J 1, S 101 (1895), BILOPOLSKI, ebenda 3, S 147 (1896), LORD, ebenda 6, S 87 (1897), FROST, ebenda 15, S 12 (1902), VOGLI, Publ Potsdam 15, Nr 45, S 22 (1907), MOFFITT, J Opt Soc Amer 20, S 457 (1930), PIASKETI, Ap J 25, S 195 (1907), 32, S 243 (1910), ROSS, ebenda 76, S 184 (1932)

Fehler durch Kompensationsokulare, die dieselbe Farbenabweichung der Brennweiten besitzen, aufgehoben werden. Durch ein Zusatzsystem von zwei getrennten kleineren Linsen¹ kann die Umkorrektur und zugleich ein besser geebnetes Bild erreicht werden, ohne daß Farbenabweichung der Vergrößerung eintritt. Alle diese Einrichtungen sind nur als Notbehelf anzusehen. Bei derselben Bauart und Brennweite des Objektivs ist die Größe der Zerstreuungsfigur infolge von Bild-

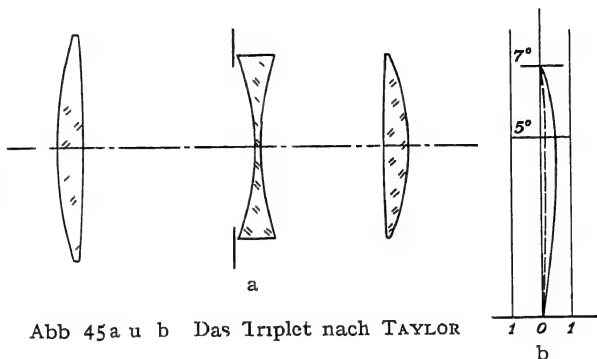


Abb 45a u b Das Triplet nach TAYLOR

krümmung und Astigmatismus für einen Punkt außer der Achse dem Durchmesser des Objektivs und dem Quadrate der Hauptstrahlneigung proportional. Will man einen größeren Winkel noch scharf abbilden, so muß man den Objektivdurchmesser im quadratischen Verhältnis kleiner nehmen. Die Normalfernrohre für die photographische Himmelskarte von

340 mm Öffnung und 3,4 m Brennweite zeichnen 2,8° Gesichtsfeld aus. Lange Brennweiten dienen besonders zur Koordinaten- und Parallaxenbestimmung, zur Helligkeitsmessung und zu Spektralaufnahmen. Wo man größeres Gesichtsfeld braucht, wie für das Aufsuchen von Kometen und Planeten, das Studium von veränderlichen Sternen, von Meteoriten und des Zodiakallichts, muß man Objektive von der Bauart der gewöhnlichen photographischen verwenden, bei denen Bildkrümmung und Astigmatismus nahezu gehoben sind. Bei dem PETZVAL-

schen Objektiv² (Abb 44a) sind die Bildkrümmungen noch $\varrho_t = \varrho_i = -0,4$, es zeichnet sich aber durch kleine Zonen der sphärischen Abweichung aus. Mit einem Objektiv von 160 mm Öffnung und 800 mm Brennweite werden etwa 7° ausgezeichnet. Durch einfache Bauart zeichnet sich das Triplet nach TAYLOR³ (Abb 45a) aus, mit dem man bei gleicher Öffnung und Brennweite etwa 15° erhält. Zur Hebung der Zonenfehler kann man nach SONNEFELD⁴ bei diesem Objektiv einer Fläche der Hinterlinse

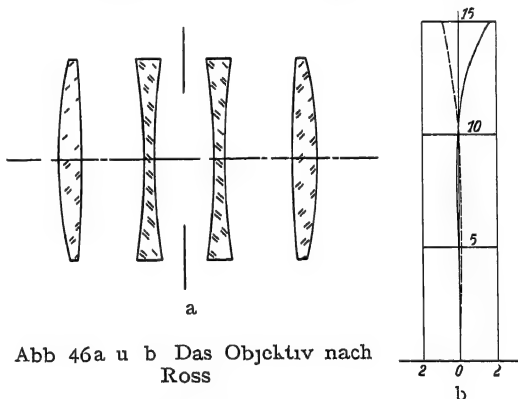


Abb 46a u b Das Objektiv nach ROSS

eine von der Kugel abweichende Gestalt geben. Das Tessar von RUDOLPH kann man seiner äußeren Form nach als ein Triplet mit verkitteter Hinterlinse beschreiben. Besonders geringe Verzeichnung für 9° Gesichtsfeld nur 0,005% bei Hebung der übrigen Bildfehler, zeigt ein Objektiv von kleinerem Öffnungsverhältnis aus vier getrennten Linsen von ROSS⁵ (Abb 46a), das von SONNEFELD⁶ durch Ein-

¹ BOEGEHOLD Z f Instrk 30, S 302 (1910), V J S 45, S 302 (1910)

² v ROHR Z f Instrk 21, S 49 (1901), BARNARD, Ap J 21, S 35 (1905) ($D = 25,4$ cm)

³ Engl Patent 15107 (1895), M N 64, S 613 (1904), SCHWARZSCHILD, Gott Abh N F 4, Nr 3 (1905), KERBER, Z f Instrk 35, S 23 (1915), 36, S 269 (1916), PEILERS, Pop Astr 27, S 349 (1919) ($D = 25,4$ cm)

⁴ Centr Z f Opt u Mech 45, S 268 (1924)

⁵ J Opt Soc Amer 5, S 123 (1921)

⁶ Dtsch opt Woch 11, S 17 (1925)

führung besonders lichtdurchlässiger Glasarten verbessert wurde. Bei dem Vierlinser mit großer Öffnung von SONNFIELD (Abb 47), für den ebenfalls besonders lichtdurchlässige Glasarten gewählt sind und bei dem die Zonen der sphärischen Abweichung durch geringere Deformation gehoben werden können, ist bei $D = 400$ und $F = 2000$ noch ein Gesichtsfeld von 15° brauchbar, die Verzeichnung beträgt nur 0,02%.

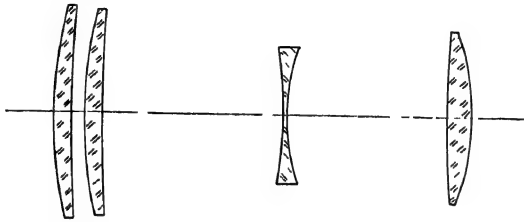


Abb 47 Der Vierlinser nach SONNERFELD

Abbildung 48 zeigt eine 0,75-fach verkleinerte Aufnahme mit einem Objektiv von diesen Daten wieder ($1^\circ = 27 \text{ mm}$), bei der die optische Achse in der einen Ecke liegt. Über Versuche mit photographischen Objektiven verschiedener Bauart für Aufnahmen von Nebeln und veränderlichen Sternen siehe GUTHNICK und PRAGER¹ sowie SCHNELLER². Für die Objektive von PERZVAL, TAYLOR und ROSS sind in Abb 44b, 45b und 46b Kurven für die sagittale (—) und tangentiale (---) Bildkrümmung gegeben. Die Verzeichnung beträgt beim Objektiv von PERZVAL für 5° $1,6\%$, für 10° $6,4\%$, beim Triplet für 5° etwa 2% , für 7° 4% Abweichung gegen die Achsenbrennweite. Die Zone der sphärischen Abweichung beträgt beim Objektiv von PERZVAL mit $1,35$ Öffnung $0,55 \text{ mm}$, beim Triplet mit $1,5$ Öffnung $3,3 \text{ mm}$ für $F = 1000$, beim Objektiv von ROSS ist sie etwa wie beim Triplet. Den Einfluß der Koma auf das Steinbild zeigt Abb 80b u c. Die Verzeichnung bei einem Triplet stellten SCHWASSMANN³, bei einem Objektiv nach ROSS-SONNERFELD ARTHUR KONIG und HECKMANN⁴ fest. WOLFER⁵ untersuchte ein Triplet, FARNSWORTH⁶ ein Doppelobjektiv, beide aus Glasarten mit großer Ultraviolett durchlässigkeit nach dem HARIMANNschen Verfahren.



Abb 48 Eine Aufnahme mit dem Vierlinser

Das Bild der Sonne kann bei der großen Helligkeit auch unter Verwendung des Okulars zur Vergrößerung des Objektivbildes auf einen Schirm projiziert werden. Das Okular muß dann etwas herausgezogen werden, so daß es ein reelles Bild entwirft. Die Vergrößerung des Okulars ist gleich dem Schirmabstand von seinem hinteren Brennpunkt dividiert durch die Brennweite, die Gesamtbrennweite ist dann gleich der Objektivbrennweite mal der Vergrößerung des

¹ Berl Ak Ber 21, S 275 (1926)

² Berlin-Babelsberg Veroff 8, Heft 6 (1931), KLUGHARDT, Z f Instik 45, S 262 (1925), BERTELE, Z f wiss Photogr 24, S 31 (1926)

³ Hamb Sternw Mitt 6, S 26 (1921)

⁴ VJS 63, S 279 (1928)

⁵ VJS 54 S 268 (1919)

⁶ Publ Yerkes Obs 4, Heft 5 (1926)

Okulares Statt das Bild zu projizieren, kann man es auch auf einer photographischen Platte aufnehmen. Für schwächere Vergrößerung der Objektivenweite eignet sich noch mehr eine achromatische Zerstreuungslinse, die zwischen dem Objektiv und dessen Brennpunkt eingeschaltet wird und wie in Abb 16 wirkt. Die Vergrößerung berechnet man in derselben Weise, nur liegt hier der hintere Brennpunkt der Zerstreuungslinse auf der dem Objektiv zugekehrten Seite. Bei gleicher Gesamtbrennweite rückt hier die Platte nicht so weit über den Objektivbrennpunkt hinaus. Diese Verbindung von Objektiv und Zerstreuungslinse bezeichnet man als Teleobjektiv, weil es zu Fernaufnahmen irdischer Gegenstände dient. Es wurde schon von KEPLER¹ beschrieben und von SCHEINER² für Sonnenprojektion benutzt. Über die Verwendung in der Astrophotographie siehe STEINHEIL³.

41 Spektrographenobjektive An die Objektive von Spektrographenkammern werden hinsichtlich der Bildkrümmung besondere Anforderungen gestellt, man verzichtet hier vielfach auf die Achromasie des Bildortes und damit auf die senkrechte Stellung der Platte zur Achse. Die Lage der Bildpunkte eines solchen Objektivs möge durch die Koordinaten x und y gekennzeichnet werden, wo x der Abstand von der achsensenkrechten Ebene im Bildpunkte der Farbe ist, der in die Achse des Objektivs fällt, und y der Abstand von dieser Achse. Wenn die Farben nacheinander auf das Minimum der Ablenkung eingestellt wurden, so wurde für den Bildpunkt einer Farbe angenähert gelten $x = c_1 \Delta n + c_2 (\Delta n)^2$. Liegen aber bei Einstellung auf das Minimum für eine ausgewählte Farbe die andersfarbigen Bildpunkte außer der Achse, so ist erstens der Unterschied q_i der Krümmung der tangentialen Bildfläche für die ausgewählte Farbe gegen eine Krümmung, die gleich der Stärke $1/f$ des Objektivs ist, zu berücksichtigen, außerdem ist die Farbenabweichung des Kollimatorobjektivs zu berücksichtigen. Ist dies nur mit sekundärem Spektrum behaftet, so ist die Verschiebung der Bildpunkte nahe proportional $(\Delta n)^2$, und es kann mit Berücksichtigung der Tiefenvergrößerung für das Spaltbild diese Änderung als eine Änderung q_i der Bildkrümmung angesetzt werden, so daß der Wert von x um ein Glied $y^2 q_i$ zu vermehren ist. Ist ε die Ablenkung für eine Farbe gegen die Achse, so kann man $\tan \varepsilon = b_1 \Delta n + b_2 (\Delta n)^2$ ansetzen. Wird die Brennweite für diese Farbe mit f bezeichnet, so ist $y = f \tan \varepsilon$. Setzt man nun $f = 1 - a_1 \Delta n$, so ergibt sich, wenn nur die Glieder bis zur zweiten Ordnung mitgenommen werden,

$$\frac{x}{y} = \frac{c_1}{b_1} \left\{ 1 + \left[\frac{c_2}{c_1} - \frac{b_2}{b_1} + a_1 + \frac{b_1^2}{2c_1(q_i + q_i)} \right] \Delta n \right\} \quad (72)$$

Wird nun eine Linsenfolge mit geeignetem Wert von q_i gewählt, so kann der Faktor von Δn gleich Null gemacht werden. Das Bild ist dann annähernd gegeben und die Plattenneigung zur Achse durch c_1/b_1 bestimmt¹. Für kleineres Öffnungsverhältnis bis etwa 1/10 kommt man mit zwei Linsen von Meniskenform (die zerstreue voraus) aus⁵, für größeres bis 1/3 braucht man drei getrennte Linsen⁴ (Abb 49). Man verwendet wohl auch nach BRASHFAR zwei einfache Sammellinsen im Abstände von nahe der halben Brennweite, von denen die eine deformiert ist⁶. PERRY⁷ korrigiert mit dem Linsenabstand die Änderung

¹ KEPLER, Dioptrice, Augsburg 1611, Oswalds Klass 144, S. 60

² Refractiones coelestes, Ingolstadt 1617, S. 91, v. ROHR, Centr Z f Opt u Mech 46, S. 233 (1925)

³ Brit J of Phot 46, S. 102 (1899)

⁴ SCHWARZSCHILD, Berl Ak Ber 1912, S. 1220, WIMMER, Phys Z 16, S. 127 (1915)

⁵ HARTMANN, Z f Instr 20, S. 17 (1900), 24, S. 1 (1904), BELOPOLSKY, Pulk Mitt 1, S. 171 (1906)

⁶ PLASKETT, Ap J 29, S. 290 (1909)

⁷ Trans Opt Soc 33, S. 170 (1932/3)

der sphärischen Abweichung mit der Wellenlänge Will man die Schiefstellung der Platte vermeiden, so muß das Objektiv achromatisch sein¹, auch für diesen

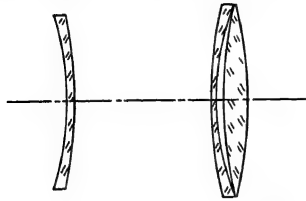


Abb 49 Der Chromat nach SCHWARZSCHILD

Fall ($c_1 = 0$) ergibt sich aus der Formel ein bestimmter Wert von ϱ_t für das Objektiv, wenn das Spektrum angenähert in eine Ebene fallen soll Als besonders lichtstarke Objektive verwendet man wohl vergrößerte Mikroskopobjektive größerer Apertur² Für Untersuchungen im ultravioletten Teil des Spektrums verwendet man Chromate aus Quarz und Achromate aus Quarz und Flußspat, Abb 50c zeigt für einen solchen Achromaten die Kurve des sekundären Spek-

trums Einen vierlinsigen Aplanaten aus Quarz und Flußspat gab GILFORD³ an Der Ersatz des teuren Flußspats durch Steinsalz⁴ oder Wasser⁵ bedeutet sonst

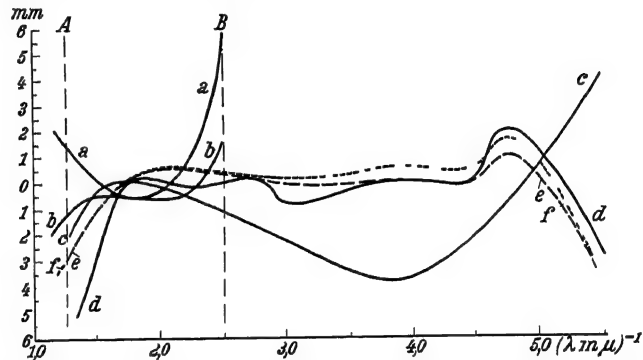


Abb 50 Das sekundäre Spektrum von Spektrometrobjektiven, Abszisse Kehrwert der Wellenlänge in μ , Ordinate Abweichung in mm für $k = 1000$, a) für einen Achromaten aus Silikatgläsern, b) für einen dreiteiligen Apochromaten, c) für ein Objektiv aus Quarz und Flußspat, d) für ein Objektiv aus Quarz, Flußspat und Steinsalz, e) und f) für ein Objektiv aus Quarz, Flußspat und Sylvin (Nach PERRY)

keine Verbesserung Dagegen wird durch Hinzunahme einer Wasserlinse⁶ das sekundäre Spektrum verringert, noch mehr durch eine Linse aus Steinsalz oder Sylvin⁷ Die Hinzunahme von Glaslinsen⁸ zu diesem Zweck kommt nur in Betracht,

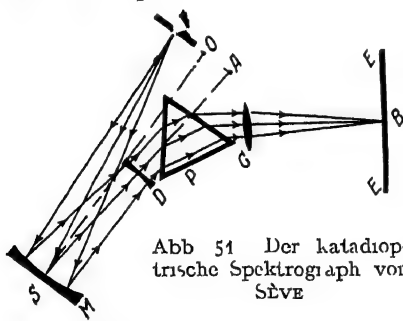


Abb 51 Der katadioptrische Spektrograph von SÈVE

wenn man nicht viel über den sichtbaren Teil des Spektrums hinausgehen will Abb 50d, e, f zeigt den Einfluß der Hinzunahme von Steinsalz oder Sylvin bei Quarz-Flußspat-Objektiven auf das sekundäre Spektrum, die Krümmungssumme für die Linsen aus Flußspat (ϱ_1), Quarz (ϱ_2), Steinsalz (ϱ_3) und Sylvin (ϱ_4) ist für die d -Kurve $\varrho_1 = 10,4207$, $\varrho_2 = -0,7323$, $\varrho_3 = 0,26736$,

¹ MOFFITT, J Opt Soc Amer 8, S 365 (1924), PIASKITT, Ap J 50 S 65 (1924)

² RAYTON, Ap J 72, S 59 (1930), HUMASON, ebenda 74, S 351 (1930), KRAMER, Z Instr 51, S 204 (1931)

³ Trans Opt Soc 30, S 34 (1928/9)

⁴ MEGGERS u BURNS, Sc Pap Bur of Stand 18, S 185 (1922)

⁵ BLOCH, Rev d'Opt 6 S 31 (1927)

⁶ BRICOUT, CR 188, S 324 (1929), Rev d'Opt 10, S 345 (1931)

⁷ PERRY, J Sc Instr 9, S 116 (1932) ⁸ LARDY, Rev d'Opt 6, S 264 (1927)

fur die e -Kurve $\varrho_1 = 10,0642$, $\varrho_2 = -6,3909$, $\varrho_4 = 0,22804$, fur die j -Kurve $\varrho_1 = 10,1744$, $\varrho_2 = -6,4897$, $\varrho_4 = 0,24128$. Auch Hohlspiegel sind als Ersatz der Objektive empfohlen worden¹, am besten ware ein exzentrischer Parabolspiegel², leider ist seine Herstellung sehr schwierig. Endlich ist noch die katadioptrische Anordnung von SEVE³ zu erwahnen, die vom Spalt ausgehenden Strahlen werden dort durch einen Hohlspiegel gesammelt und durch eine Zerstreuungslinse parallel gemacht, das Objektiv ist eine Sammellinse von gleicher Brennweite und aus gleichem Stoff, so daß die Farbenabweichung der beiden Linsen sich aufhebt (Abb 51).

42 Über Glasbeschaffenheit Fur die Leistung des starker vergroßernden Fernrohrs ist das Objektiv maßgebend. Es bestimmt die Bildscharfe in der Achse, die fur Beobachtungszwecke entscheidend ist, die Farbenabweichung und die Ausfuhrungsfehler, die das Bild in der Achse verschlechtern, können durch das Okular nicht ausgeglichen werden. Die größte Schwierigkeit fur die Herstellung größerer Objektive ist die Beschaffung geeigneter Glasscheiben. Trotz aller Vorsicht beim Rühren der flussigen Masse ist das Glas nach der Erkal tung nicht frei von Schlieren, Streifen abweichender chemischer Zusammensetzung und daher auch verschiedener Brechung⁴. Es wurden Unterschiede zwischen der Brechung der Schliere und der ihrer Umgebung bis zu vier Einheiten der 4 Dezimale festgestellt. Während einzelne scharfe Schlieren die Leistung des Objektivs kaum beeinträchtigen, sind Bündel von Schlieren und biete, verwaschene Schlieren gefährlich.

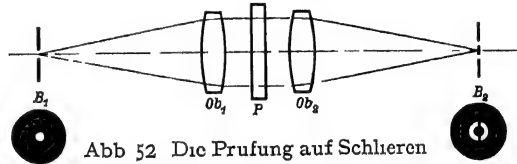


Abb 52 Die Prüfung auf Schlieren

Am einfachsten beobachtet man die Schlieren, wenn man durch die um Armeslänge entfernte Platte nach der Grenze von Hell und Dunkel, etwa dem Fensterrande, sieht und die Platte quer zur Blicklinie bewegt. Bequemer werden sie sichtbar gemacht, wenn man mit einer nahezu punktförmigen Lichtquelle eine Schattenprojektion der Platte auf einem von ihr entfernten Schirm entwirft. ARNULF gab ein Verfahren an, um durch stereoskopische Wahrnehmung die Lage der Schlieren der Tiefe nach festzustellen. Auch das FOUCAULTsche Schneidverfahren (Ziff 70) und das TOPPLERSche Schlierenverfahren können angewandt werden. Nach Abb 52 wird das Bild der Öffnung B_1 durch die Blende B_2 abgedeckt, so daß nur Strahlen, die in der Glasplatte P zwischen den Objektiven Ob aus ihrem normalen Verlauf abgelenkt sind, an B_2 vorbei in das Auge gelangen können, der kreisförmigen Öffnung entspricht eine kreisförmige Deckblende wie in Abb 52, noch besser ist kreisringförmige Öffnung und Blende. Um die Fehler der Oberfläche bei der Prüfung auszuschalten, empfiehlt es sich, die Platte in eine geeignete Flüssigkeit, Benzol, oder in eine Mischung mit gleicher Brechung aus α -Monochlornaphthalin und Gasolin einzutauchen. Abb 53 zeigt die Aufnahme einer Glasscheibe mit Schlieren.

Ebenso zeigt das erkaltete Glas bei der Untersuchung im polarisierten Licht Spannung, die man durch nachträgliche Feinkühlung, d. h. Wiedererwärmen bis

¹ WADSWORTH, Phil Mag 38, S 137 (1894), Ap J 2, S 264 (1895), HOUSION, Proc Opt Convention 2 S 100 (1912)

² PICKERING, Nature 24, S 389 (1881), POOR, Ap J 6, S 440 (1897), SONNEFELD, Centr Z f Opt u Mech 43, S 442 (1922)

³ C R 182, S 57 (1926), MEYERMANN, Z f Instrk 46, S 485 (1926)

⁴ MARTIN, Ann de l'Ecole Norm sup 10 (1881), CZAPSKI, Z f Instrk 5, S 117 (1885), MICHELSON, Sc Pap Bur of Stand 15, S 41 (1919/20), SMITH, BENNETT u MERRITT, ebenda 16, S 75 (1920), ARNULF, Rev d'Opt 6, S 1 (1927), J de Phys Bull No 336, S 36 (1933)

nahezu zum Weichwerden und besonders am Anfang langsame, sorgfältig geregelte Abkühlung möglichst zu beseitigen sucht¹ Ueber den Spannungszustand von Fernrohrscheiben machte zuerst CZAPSKI² Versuche. Er beobachtete im polarisierten Licht, das parallel zur Platte durch die angeschliffenen parallelen Seitenflächen hindurchging. Nach ihm ist eine schnell gekühlte Platte in ihrer Mittelschicht gedehnt, nahe der Oberfläche zusammengepreßt, dazwischen aber liegt eine neutrale spannungsfreie Zone, es erklärt sich dies durch die schnellere Abkühlung der Oberfläche beim Erstarren. An der Oberfläche findet beim Durchgang parallel zur Platte eine stärkere Verzögerung des Lichtes statt als in der Mitte, die Brechzahl nimmt nach dem Rande zu. Diese Zunahme kann bei 30 mm Dicke eine Einheit der 4 Dezimale erreichen. ZSCHOKKE³ fand bei gut gekühlten Platten die Brechzahl in der Mitte und am Rande bei senkrechtem Durchgang um $1\frac{1}{2}$ Einheiten der 4 Dezimale verschieden. Die Verzögerung findet CZAPSKI für das senkrecht zur Platte polarisierte Licht etwa halb so stark als für das parallel zu ihr polarisierte. Die Schichten gleicher Brechzahl stehen nach WUSING⁴ bei Linsen in



Abb 53 Die Aufnahme einer Scheibe mit Schlieren

der Nahe der Achse auf dieser senkrecht, sie biegen am Rande um und rücken mehr zusammen. Die Zonenabweichung des Potsdamer Refraktors konnte WUSING durch Annahme schlechter Kühlung im wesentlichen erklären, dagegen fand er den Einfluß der Doppelbrechung auf die Bildgüte unerheblich. Der Abstand der beiden Bilder war unter 0,01 mm.

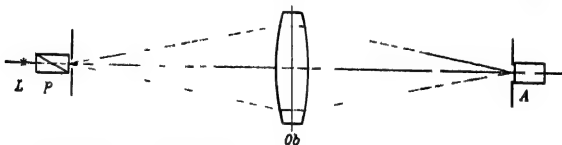


Abb 54 Die Prüfung einer Linse auf Spannung

Die Prüfung auf Spannung erfolgt im polarisierten Licht nach Abb 54. Die von der Lichtquelle L ausgehenden Strahlen durchsetzen den Polarisator P , die zu prüfende Linse Ob oder auch eine Linse und dann die zu prüfende Platte, zuletzt den Analysator A . Es ist zweckmäßig, wenn die Platte um die optische Achse oder statt dessen auch die beiden Nicols gemeinsam gedreht werden können. Wenn regelmäßige Spannung vorhanden ist, die bei nicht zu starkem

¹ SCHOTI / I Instrk 10, S 42 (1890)

² Ann d Phys 42, S 319 (1891)

³ Z f Instrk 29, S 286 (1909), Goetz-Festschrift 1911, S 133

⁴ Beil Ak Ber 1913, S 920, A N 198, S 139 (1914), / I Instrk 31 S 341 (1914)

⁵ E u L MACH, Wiener Ber 98 II, S 1327 (1889), SCHUIZ, Phys / 13, S 1017 (1912), Z f Instrk 33, S 247 (1913), ZSCHIMMER u SCHUIZ, Ann d Phys 42, S 345 (1913), BOISSIER, Rev d'Opt 2, S 107 (1923) LARDY, ebenda 8, S 59 (1929)

Grade unbedenklich ist, beobachtet man ein Achsenkreuz ähnlich wie bei einer senkrecht zur Kristallachse geschnittenen Platte eines einachsigen Kristalls (Abb 55) Man kann auch in Autokollimation (Ziff 61) beobachten, und zwar bei einer Platte, wenn man hinter ihr einen Hohlspiegel aufstellt, von dessen Krümmungsmittelpunkt man das Licht ausgehen läßt, in Abb 56 ist S dieser Hohlspiegel, *Pl* die zu prüfende Platte, die übrigen Bezeichnungen sind wie in Abb 54 Ein Objektiv kann man ebenso durch Aufstellung vor einem Planspiegel prüfen Hat man Platten mit unebenen, schlecht polierten Oberflächen, so läßt man das Licht einer großen, sehr hellen, das Licht diffus zerstreuen Oberfläche von einem schwarzen Spiegel unter dem Polarisationswinkel reflektieren, ehe es durch die Platte und das NICOLSche Prisma ins Auge gelangt, es genügt dann, wenn man die Platte mit Schmieröl einfettet Während diese Untersuchung ausreicht, um die optische Brauchbarkeit der Platte festzustellen, können verschiedene Verfahren zu einer genaueren Untersuchung der Doppelbrechung dienen, es handelt sich dabei meist um die Feststellung des Gangunterschiedes nach Verfahren, die den in der Kristallographie üblichen ähnlich sind Man kann aber auch zu diesem Zweck das Messerschneidenverfahren von FOUCAULT (Ziff 70) durch ein WOLLASTONSches Prisma in der Nahe des Bildes ergänzen, das dieses verdoppelt Indem COUDER¹ bei fertigen Objektiven die Änderung der Schnittweiten beider Bilder für verschiedene Stellen

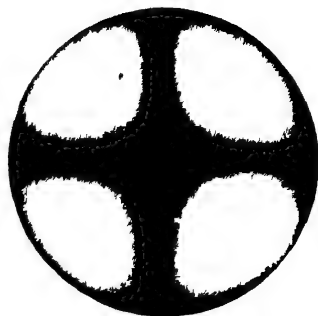


Abb 55 Spannungsbild einer Scheibe

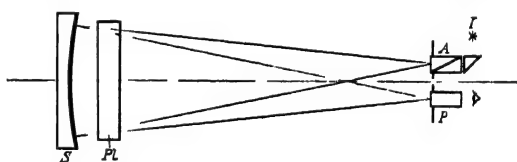


Abb 56 Die Prüfung auf Spannung mit einem Spiegel in Autokollimation

der Öffnung in dieser Weise maß, erhielt er durch den Unterschied der Schnittweiten ein Maß für den Gangunterschied ε , er fand, daß nahezu $\varepsilon = ar^2$ gilt, wo r der Achsenabstand ist Die Doppelbrechung nimmt also mit dem Quadrat des Abstandes r von der Mitte der Scheibe zu Die langsamere Welle schwingt radial, in der Ebene durch die Mitte der Scheibe und den Strahl, die schnellere schwingt tangential Bei einem Objektiv mit starker Spannung dieser Art, aber sonst guter Beschaffenheit, verschwanden die Beugungsringe in einem Halo und traten erst wieder hervor, als so weit abgeblendet war, daß der Gangunterschied am Rande $0,09\mu$ betrug Ändert sich der Gangunterschied längs des Randes bis zu $0,02\mu$, so ist auch in diesem Falle keinerlei Verschlechterung des Bildes zu entdecken Starke Spannung kann die Erhaltung genauer Oberflächen bei Temperaturänderungen verhindern² Aus der beobachteten Doppelbrechung erschließt COUDER die Verteilung der Spannungen in einer runden Glasplatte vom Durchmesser $2R$ und sehr geringer Dicke Ist S die radial gerichtete Kraft, T die tangential, und zwar positiv, wenn Druckspannung vorliegt, so ist

$$S = -\frac{a}{2k}(R^2 - r^2), \quad T = -\frac{a}{2k}(R^2 - 3r^2), \quad (73)$$

a ist die obenerwähnte Konstante für die Doppelbrechung, k ist für Spiegelglas $0,0357 \cdot 10^{-3}$, für gewöhnliches Kron $0,0334 \cdot 10^{-3}$, für Schweißflint $0,0227 \cdot 10^{-3}$

¹ BA 7, S 353 (1932)² COMMON, Proc R Soc London 50, S 252 (1891)

Bei einer untersuchten Scheibe von 1,2 m Durchmesser erreichte der Druck auf das cm^2 120 kg

Die Durchbiegung infolge der Schwere ist je nach der Lage des Objektivs verschieden, sie ist bei Linsen weniger gefährlich wie bei Spiegeln, da die Wirkungen der Veränderung der beiden Flächen der Linse sich gegenseitig nahe aufheben, die optische Weglänge von Bild- bis Dingpunkt wird ja nur wenig geändert. Die Durchbiegung ist am wenigsten schädlich, wenn die Strahlen die Linse im Minimum der Ablenkung durchsetzen (s auch Ziff 54)). Über die Verhütung von Feuchtigkeitsniederschlag auf Objektiven siehe STEAVENSON¹

43. Absorption, Temperaturänderung und Zentrierung von Objektiven

Mit dem Lichtverlust beim Objektiv durch Reflexion an den Durchtrittsflächen der Linsen (Ziff 34) und durch Absorption im Glase beschäftigt sich VOGEL². Messungen der Absorption für verschiedene Glasarten im sichtbaren und ultravioletten Teil machten PFLUGER³ und KRUSS⁴. MOORE⁵ fand für den Lick-Refraktor mit Zusatzlinse für Photographie einen Lichtverlust von 49% für $\lambda = 0,45 \mu$. GUTHNICK und PRAGER⁶ erhielten bei einem Objektiv von 310 mm Öffnung und 5000 Brennweite eine Lichtdurchlässigkeit von 79% für $\lambda = 0,54 \mu$, von 72% für $\lambda = 0,405 \mu$ und von 44% für $\lambda = 0,365 \mu$. Über die Lichtdurchlässigkeit von photographischen Objektiven siehe KLUGHARDT⁷.

Es möge noch auf die Änderung der Brennweite eines dünnen Objektivs aus zwei Linsen mit der Temperatur eingegangen werden⁸. Neben der Änderung der Form durch die Ausdehnung kommt die Änderung dN der Brechzahl mit der Temperatur T in Betracht. α_1, α_2 und α_L seien die Ausdehnungskoeffizienten für die erste und zweite Linse sowie für Luft. Ist n bzw. N die Brechzahl des Glases, bezogen auf den leeren Raum bzw. auf Luft, und n_L die Brechzahl für Luft, so ist $N = n n_L$, und es gilt angenähert

$$dN = dn - n dn_L \quad (74)$$

Für die Abhängigkeit der Brechzahl n_L der Luft von der Temperatur T und dem Barometerstand p gilt, wenn bei dn_L höhere Glieder vernachlässigt werden,

$$n_L - 1 = \frac{n_{L,0} - 1}{1 + \alpha_L T} \frac{p}{760}, \quad dn_L = -(n_{L,0} - 1) \alpha_L dT + (n_{L,0} - 1) \frac{dp}{760} \quad (75)$$

Für die Änderung der Brennweite F ergibt sich nun, wenn die Krümmungsradien mit r_1 bis r_4 bezeichnet werden,

$$-\frac{dF}{F^2} = [dN_1 - (N_1 - 1) \alpha_1] \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + [dN_2 - (N_2 - 1) \alpha_2] \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \quad (76)$$

Diese Änderung der Brennweite kann durch passende Wahl der Glasarten oder durch eine entgegengesetzte Änderung ausgeglichen werden, die durch Änderung des Linsenabstands bewirkt wird, indem die Linsen an den Enden von Rohren sitzen, die verschiedene Ausdehnung haben und an dem dem Objektiv entgegengesetzten Ende miteinander verbunden sind⁹. Die Änderung der Brennweite mit der Temperatur ist jedoch nur klein, bei den gewöhnlichen Glasarten ergibt sich der Größenordnung nach $dF/F = 3 \cdot 10^{-5}$ für 1° . In solchem Falle waren Messingrohre Stahlrohren vorzuziehen, doch kommt es sehr auf die Glasarten

¹ J B A A 42, S 101 (1932)

² Berl Ak Ber 46, S 1219 (1896)

³ Ann d Phys 11, S 561 (1903)

⁴ Z f Instrk 23, S 197 (1903)

⁵ Ap J 20, S 292 (1904)

⁶ Berlin-Babelsberg Vicroff 1, S 7 (1914)

⁷ Centr Z f Opt u Mech 47, S 79 (1926)

⁸ KRÜGER, A N 60, S 65 (1863), SUNDELL, ebenda 103, S 19 (1882), 111, S 257 (1885), HASTINGS, ebenda 105, S 69 (1883), WADSWORTH, Ap J 17, S 17 (1903)

⁹ Soc d'Opt Dtsch R Patent 339895 (1919)

an Beim Refraktor ($D = 65$ cm) von Berlin-Babelsberg ergab sich $5,7 \cdot 10^{-6}$ für dF/F , die Änderung der Einstellung $4,3 \cdot 10^{-6}$ in entgegengesetztem Sinne¹ Beim Yerkes-Fernrohr wurde festgestellt, daß sich die Brennweite bei 1° Temperaturänderung um 0,43 mm, die Rohrlänge um 0,23 mm ändert Eine Liste über solche Feststellungen bei verschiedenen großen Fernrohren gibt WADSWORTH² Bei steigender Temperatur hinkt die Änderung im Glase nach, die Brennweite ist kürzer als berechnet und umgekehrt Eine Objektivfassung, die Verspannung der Linsen bei Änderung der Temperatur ausschließen soll, gab STEINHEIL³ an

Um zu prüfen, ob die optische Achse des Objektivs mit der des Fernrohrs zusammenfällt, empfiehlt WOLLASTON⁴ die Benutzung der Spiegelbilder, die von einem Lichtpunkt auf der Achse durch Reflexion an den Linsenflächen entstehen, dies Verfahren kann auch zum Ausrichten der Linsen eines Objektivs zueinander dienen PRECHTL⁵ benutzt ein auf das Objektiv aufgesetztes Zentrierfernrohr mit drei Füßen Für das Ausrichten der photographischen Platte senkrecht und symmetrisch zur Achse eines Hohlspiegels bzw eines Objektivs benutzen FARNSWORTH⁶ bzw ARTHUR KONIG und HECKMANN⁷ ebenfalls ein solches OLSSON⁸ setzt an Stelle der photographischen Platte eine solche mit Gitter ein, er bewegt dann das Auge, bis sein Spiegelbild auf eine auf das Objektiv gesetzte kleine Blende fällt, und bezeichnet auf der Platte die anvisierte Stelle, die der Senkrechten von der Objektivmitte auf die Platte entspricht

44. Große Refraktoren. Nach HOLLIS⁹ werde hier gekürzt und ergänzt eine Liste der großen Fernrohre wiedergegeben

Liste der Refraktoren mit 50 cm Öffnung und mehr
[B für Beobachtung P für Photographie, T technische Konstante (Ziff 72)]

Öffnung in mm	Öffnungs- verhältnis	Ort () Muttersternwarte	Geschliffen von	Im Jahr	T
500	B 1 24	Potsdam	STEINHEIL	1903 ¹⁰	außer Gebrauch
500	B 1 16,2	Stockholm	GRUBB	1932 ¹¹	
506	B 1 16,8	Oakland, Kalifornien	BRASHEAR	1914	
506	B P 1 16,8	Denver, U S A	CLARK	1894	
506	B 1 16,8	Middleton, U S A	CLARK	1925 ¹²	
559	B 1 17	Edinburgh, Calton Hill	WRAY	1862	
585	B 1 15,6	Princeton	CLARK	1881	
600	B (coude) 1 30	Paris	HENRY	1889 ¹³	
600	B P 1 15	Hamburg-Bergedorf	STEINHEIL	1911 ¹⁴	
600	P 1 24	Potsdam	ZEISS	1925 ¹⁵	0,15
600	B 1 18	Lembang, Java	ZEISS	1927	0,311
600	P 1 18	Lembang, Java	ZEISS	1927	0,119
600	P 1 13,5	Stockholm	GRUBB	1932 ¹¹	0,155
610	B 1 18	Swarthmore (Pennsylvania), Sproul Obs	BRASHEAR	1911	

¹ STRUVE Berlin-Babelsberg Veroff 3, Heft 1, S 57 ² M N 63, S 573 (1903)

³ Z f Instrk 14 S 170 (1894)

⁴ Phil Trans 1822, S 32 Gilberts Ann 73, S 261 (1825)

⁵ Praktische Dioptrik Wien Heubner 1828 ⁶ Pop Astr 29, S 207 (1921)

⁷ V J S 63, S 279 (1928) ⁸ A N 146, S 137 (1898)

⁹ Obs 21, S 239 (1898), 37, S 245 (1914), siehe auch Sirius 32, S 37 (1899), HARPER, J Can R A S 23, S 351 (1929), STEAVENSON, Obs 53, S 311 (1930), LOCKYLL, Nature 112, S 284 (1923)

¹⁰ VOGEL, Z f Instrk 22, S 169 (1902), Publ Potsdam 15, Nr 45 (1907)

¹¹ Engineering 131, S 257 (1931), 132, S 275 (1931)

¹² SLOCUM, Pop Astr 33, S 171 (1925) ¹³ LOEWY, C R 118, S 1295 (1894)

¹⁴ SCHORR, V J S 50, S 80 (1915) ¹⁵ FREUNDLICH, Die Sterne 5, S 33 (1925)

Liste der Refraktoren mit 50 cm Öffnung und mehr
(Fortsetzung)

Öffnung in mm	Öffnungs- verhältnis	Ort () Muttersteinwarte	Geschliffen von	Jahr	<i>f</i>
610	<i>B</i> 1 15,5	Flagstaff, Arizona, Lowell Obs	CLARK	1896 ¹	
610	<i>P</i> 1 17,5	Santiago	GRUBB	1935	
610	<i>P</i> 1 11,2	Oxford	GRUBB	1902 ²	
610	<i>P</i> 1 11,2	Kapstadt	GRUBB	1897	
610	<i>P</i> 1 6	Bloomfontein S A (Harvard Coll Cambridge, U S A)	CLARK	1893 ³	{ (PITVAL- sches Objektiv)
620	<i>P</i> 1 25,6	Meudon	HENRY	1891	
635	<i>B</i> 1 14,3	Cambridge Univ, England	COOKL und Sons	1889	
650	<i>B</i> 1 16	Berlin-Babelsberg	ZISS	1914 ⁴	0,22
650	<i>P</i> 1 16	Mitaka b Tokyo	ZISS	1930	0,184
650	<i>B</i> 1 16	Belgrad	ZISS	1930	0,181
660	<i>P</i> 1 16,7	Johannesburg (New Haven Connecticut)	FLECKER	1926	
660	<i>B</i> 1 16	Johannesburg	GRUBB	1925 ⁵	
660	<i>B</i> 1 15	Charlottesville, Virginia, McCormick Obs	CLARK	1874	
660	<i>P</i> 1 10,4	Washington, Naval Obs	CLARK	1871 ⁶	
680	<i>B</i> 1 15,5	Greenwich	GRUBB	1897 ⁷	
685	<i>B</i> 1 17,8	Wien	GRUBB	1878 ⁸	0,46
		Bloomfontein S A (Ann Arbor)	FLECKER	1926	
700	<i>B</i> 1 30	Icplew	SHIMMITH	1896 ⁹	
711	<i>B</i> 1 11,9	Greenwich	GRUBB	1897 ⁷	
760	<i>B</i> 1 18,5	Pulkowa	CLARK	1885 ¹⁰	0,18
760	<i>P</i> 1 18,5	Pittsburg, Allegheny Obs	BRASHIRAK	1912	
760	<i>B</i> 1 20,8	Nizza	HENRY	1886	
800	<i>P</i> 1 15	Potsdam	SHIMMITH	1903 ¹¹	0,34
830	<i>B</i> 1 19,5	Meudon b Paris	HENRY	1889	
911	<i>B</i> 1 20	Mt Hamilton, Dick Obs	CLARK	1888 ¹²	
1020	<i>B</i> 1 19,1	Williams Bay, Yerkes Obs	CLARK	1897 ¹³	0,16

Die Entwicklung der Refraktoren bis zu 50 cm Öffnung sei noch durch die folgenden Stufen gekennzeichnet: Dorpat 24,4 cm 1826¹⁴, München 30,5 cm 1837, Pulkowa 38 cm 1839. Endlich seien noch einige Quellen betreffend Normal-

¹ SLL Pop Astr 4, S 297 (1896/7), DOUGLASS, ebenda 4, S 189 (1896/7)

² Engineering 82, S 819 (1906)

³ PICKERING, Sunus 32, S 112 (1899)

⁴ SERUZI, Berlin-Babelsberg Veroff 3, Heft 1 (1919)

⁵ ROBBINS, Nature 112, S 104 (1923)

⁶ HALI, Pop Astr 27, S 278 (1919), Publ Naval Obs 12 S 1 (1930)

⁷ Nature 56, S 134 (1897), Mechaniker 9, S 25 u 52 (1901)

⁸ Engineering 29, S 7 (1880), 30, S 421 (1880)

⁹ HORRI, Glasgow Ann f Gewerbe u Bauw 19, S 1 (1901), Mechaniker 6, S 111 (1898), 10, S 25 (1902)

¹⁰ SIRUVE, AN 102, S 49 (1882), Der 30"-Refraktor der Steinwarte Pulkowa Petersburg Druckeri der K Akad 1889, r 1 russisch, W L P, Nature 42 S 204 (1890)

¹¹ VOGEL, Zf Instrk 22, S 169 (1902), Publ Potsdam 15, Nr 15 (1907)

¹² YOUNG, Engl Mech 44, S 149 (1887), Engineering 16, S 155 (1888)

¹³ HAIR, Ap J 6, S 147 u 262 (1897), Enginier 76, S 593, L'AVNI Pop Astr 1, S 176 (1893/4)

¹⁴ FRAUNHOFER, AN 4, S 17 (1826), SIRUVE, Dorpater Refraktor Dorpat Schumann 1825, Mem R A S 2, S 93 (1826), Description de l'Observatoire astronomique central de Poulkova Petersburg Impr de l'Acad des Sciences 1815

refraktoren für Photographie¹ sowie über die Untersuchung der Objektive auf sphärische² und chromatische³ Abweichung angegeben

45 Die astronomischen Okulare Als Okular⁴ des astronomischen Fernrohrs verwendete man ursprünglich eine einfache Sammellinse. Ihr Hauptfehler ist der Farbenunterschied der Vergrößerung, der darauf beruht, daß die am Rand durchgehenden Hauptstrahlen für die verschiedenen Farben verschiedene Ablenkungen erfahren. Diesen Fehler beseitigte zuerst HUYGENS⁵ bei dem nach ihm benannten Okular aus zwei getrennten Linsen *A* und *B* (Abb 57). Nach Ziff 21 ist es bei zwei Sammellinsen in größerem Abstand möglich, die Brennweiten für die zwei Farben gleichzumachen. Nun fallen bei starkerer Vergrößerung die von der Objektivmitte ausgehenden Hauptstrahlen nahe parallel auf das Okular, wenn die Brennweiten

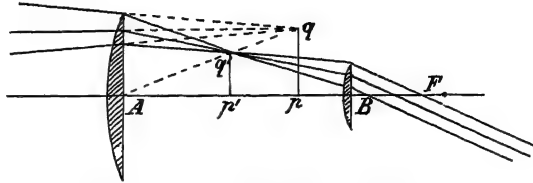


Abb 57 Das HUYGENSSche Okular

für zwei Farben gleich sind, müssen also auch die Hauptstrahlen für diese beiden Farben in der gleichen Richtung austreten. Obwohl die verschiedenfarbigen Bilder in verschiedenen Ebenen hintereinander liegen, erscheinen sie unter dem gleichen Winkel, und die Fernrohrvergrößerung ist für beide Farben die gleiche, zum mindesten für ein kleines Gesichtsfeld. Durch geringe Abweichung von dieser Bauart des Okulars kann auch für endlichen Abstand des dingseitigen Kreuzungspunkts der Hauptstrahlen und für größere Hauptstrahlenneigung farbenfreie Vergrößerung erreicht werden. Für die Gesamtbrennweite 1 der Urform dieses Okulars ist $f_1 = 2,3$, $f_2 = 2$, $d = 4,3$. Der vordere Brennpunkt dieses Okulars ist virtuell, beim Fernrohr treffen also die vom Objektiv kommenden Strahlen, ehe sie sich zu einem Bildpunkt *q* vereinigen, auf die vordere Linse und werden erst in kürzerem Abstand hinter dieser in *q'* zu einem reellen Bildpunkt vereinigt. In dieser Bildebene ist auch die Gesichtsfeldblende anzubringen. Da sie nur durch die hintere Linse angesehen wird und von einem durch den Rand dieser Blende gehenden Hauptstrahl der blaue Bestandteil durch die hintere Linse starker gebrochen wird, erscheint der Blendenrand blau gesäumt. Daß durch das ganze Okular ein Hauptstrahl ohne Farben abgelenkt wird, erklärt sich daraus, daß der blaue Strahl in der hinteren Linse näher der Achse auftrifft und so schwächer gebrochen wird. Das Okular nach HUYGENS eignet sich weniger für Fernrohre mit Mikrometer, da der Faden nur durch die hintere Linse angesehen wird und daher außerhalb der Mitte des Gesichtsfeldes Farbensäume zeigt. Die übrigen Bauarten der Okulare besitzen

¹ GRUBB, Engineering 44, S 626 (1887), 45, S 402 (1888), 50, S 720 (1890), VOGLL, Z f Instrk 9, S 193 (1899)

² HANSKY, Bull Ac St Petersburg 20, Nr 2 (1904) (Pulkowa), PLASKETT, Ap J 25, S 195 (1907) (15" Ottawa), HARTMANN, Publ Potsdam Nr 46 (1908) (Potsdam u andere), MILLER u MARRIOTT, J Franklin Inst 178 S 465 (1914) (24" Sproul Obs), SCHORR V J S 50, S 80 (1915) (Hamburg), STRUVE, ebenda 52 S 179 (1917) (Neubabelsberg), WIRL, A N 202, S 95 (1916) DANJON Rev d'Opt 3 S 305 (1924) (Straßburg), DEMETRESCU, ebenda 2, S 452 (1923) 3 S 530 (1924) (Bukarest), DEPPERMAN Publ Manila Obs 1, Nr 6 (1929)

³ VOGEL, Berl Ak Ber 1880, S 440, Publ Potsdam 4, Nr 14 (1884), KELLER Iick Publ 3, S 174 (1894), CUNNINGS u FAIRFIELD, Publ A S P 31, S 25 (1919), KEELER, Ap J 3, S 154 (1896), Fox ebenda 27, S 237 (1908) (Yerkes), FASSBENDER u WETTHAUER Z f Instrk 33, S 265 (1913) (Achromate u Apochromate)

⁴ ZSCHOKKE, Centr Z f Opt u Mech 49, S 336 (1928), BIOT, Ann de Bruxelles 52, S 5 (1932)

⁵ Dioptrica, Leyden Boutesteyn 1703, Prop 51

reellen vorderen Brennpunkt, so kann auch beim Mikrometer das Okular leicht gegen eins mit anderer Vergrößerung umgewechselt werden. Das Okular von RAMSDEN¹ besteht ebenfalls aus zwei einfachen Linsen A und B , deren Einzelbrennweiten und Abstand gleich der Gesamtbrennweite ist. Ein parallel zur Achse einfallender Hauptstrahl wird durch die vordere Linse in seine farbigen

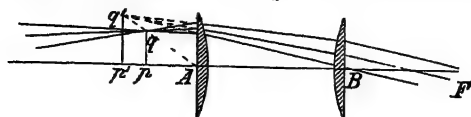


Abb 58 Das RAMSDENSche Okular

Bestandteile zerlegt, da diese aber von der vorderen Brennebene der hinteren Linse ausgehen, treten sie in erster Näherung aus dieser Linse parallel aus. Die vordere Linse vergrößert nicht, sondern ändert nur die Richtung der Hauptstrahlen. Wurde man sie fortlassen, so wäre das Gesichtsfeld durch die kleinere Hinterlinse bestimmt. Man nennt die Vorderlinse daher Feld- (Kollektiv-) Linse zum Unterschied von der hinteren (Augen-) Linse und dehnt diese Bezeichnung auch auf andere Okulare, wie z. B. das von HUYGENS, aus. Bei der praktischen Ausführung des Okulars nach RAMSDEN (Abb 58) weicht man meist von der Grundform ab, damit sowohl die vordere

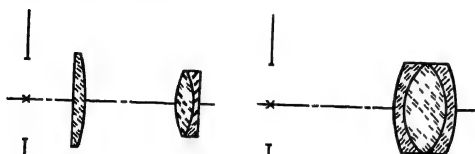


Abb 59 Das KELLNERSche Okular

Abb 60 Das monozentrische Okular

Bildebene von der Feldlinse A wie auch die Austrittspupille von der Augenlinse B genügend Abstand erhält. Von dem Fernrohrbild pq entwirft zunächst A ein virtuelles Bild $p'q'$. Man nimmt etwas Farbenunterschied der Vergrößerung in Kauf. Will man diesen Fehler vermeiden, so bildet man nach KELLNER² die Augenlinse als verkittete, annähernd achromatische Doppellinse aus (Abb 59). Dieses Okular hat das einfache nach RAMSDEN verdrängt. Es zeichnet sich vor dem nach HUYGENS auch durch den großen Abstand des hinteren Brennpunkts von der Augenlinse aus und damit auch durch großen Abstand der Austrittspupille, es ist so für kürzere Brennweiten vorzuziehen. Ähnlich wie bei den Objektiven kann der Farbenunterschied der Vergrößerung auch dadurch gehoben werden, daß man das Okular

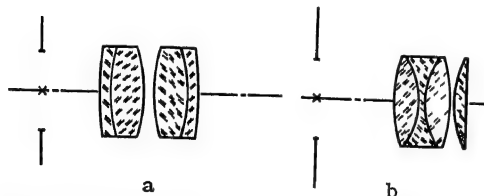


Abb 61 Orthoskopische Okulare a) nach PLOSSL, b) nach ABBI

als achromatisches Linsensystem ohne große Abstände ausbildet, bei dem auch die Farbenlangabweichung nahezu gehoben ist. Hierbei gehören die monozentrischen Okulare³ aus drei miteinander verkitteten Linsen (Abb 60) und die sog. orthoskopischen Okulare (Abb 61), die entweder aus einer einfachen und einer dreifachen verkitteten Linse oder aus zwei verkitteten Doppellinsen bestehen. Diese Okulare besitzen noch größeren Abstand der Augenpupille als das KELLNERSche, sie eignen sich daher besonders für kürzere Brennweiten. Während man bei den bisher aufgeführten Okularen mit dem Gesichtsfeld nicht über 50° hinauszugehen pflegt, ist bei den Okularen von ERFFIE⁴ ein solches von 70° erreicht (Abb 62).

¹ Phil Trans 73, S 94 (1783)

² Das orthoskopische Okular Braunschweig Vieweg 1849

³ STEINHEIL, Gott Nachr 1865, S 140, KRÜSS, Pogg Ann 153, S 601 (1874)

⁴ Centr Z f Opt u Mech 42, S 501 (1921)

Die Okulare werden meist auf Bildfeldebnung im übertragenen Sinne korrigiert, sie haben gewöhnlich geringe kissenförmige Verzeichnung, die infolge der kreisförmigen Begrenzung des Gesichtsfeldes weniger auffällt. Die Bildfehler der Okulare außer der Achse hat zuerst AIRY¹ untersucht, anastigmatische Okulare haben infolge ihres komplizierten Baus keine Verbreiterung gefunden.²

Die Okulare sind in der Richtung der optischen Achse verschiebbar, damit auch fehlsichtige Personen das Bild scharf einstellen können. Liegt der vordere Brennpunkt des Okulars hinter dem hinteren des Objektivs, so entsteht ein

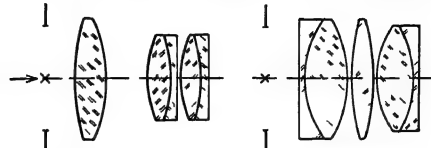


Abb 62 70°-Okulare nach ERFLE

reelles Bild im Endlichen hinter dem Okular, das für einen Übersichtigen paßt. Liegt der Brennpunkt davor, so paßt das virtuelle Bild vor dem Okular für einen Kurzsichtigen. Aber auch rechtsichtige Beobachter stellen das Okular meist so ein, daß das Bild nicht im Unendlichen liegt, sondern entsprechend der Akkommodation von einigen Dioptrien auf die Nahe. Es ist daher zweckmäßig, beim Scharfstellen das Okular nach innen zu verschieben und anzuhalten, wenn das Bild eben scharf wird. Bei schwacher Beleuchtung stellen manche Beobachter anders ein. So fand RAYLEIGH³ dann eine Verbesserung des Sehens ohne Fernrohr, wenn er eine Brille von $-1D$ aufsetzte. Vielleicht erklärt sich dies durch die sphärische Abweichung des Auges und gegebenenfalls des Okulars bei größerer Pupille. Bemerkenswert ist ferner, wie die Akkommodation beim Sehen durch das Fernrohr nahezu ausgeschaltet ist und mit welcher Sicherheit auch jüngere Personen immer in derselben Okularlage scharf einstellen. Fällt die Austrittspupille in den hinteren Brennpunkt des Okulars, wie es bei den astronomischen Fernrohren meist nahezu der Fall ist, besonders bei starker Fernrohrvergrößerung, so ist bei einer Verschiebung Δx des Okulars der Abstand des Bildes von der Austrittspupille $-f^2 \Delta x$. Ist dieser Abstand gleich dem Fernpunktsabstand des Auges, so ist die Okularverschiebung der Dioptrienzahl der Fernbrille proportional, man kann daher für die Verschiebung eine gleichmäßige Dioptrienteilung anbringen. Vergrößerung, Gesichtsfeld und Helligkeit werden durch die Verstellung des Okulars ein wenig verändert, und zwar wird in dem Verhältnis $1 + f(\Gamma x')$, wo $1000 x'$ die Dioptrienzahl ist, die Vergrößerung gesteigert, die Austrittspupille verkleinert, wenn man das Fernrohr für sich untersucht.

46 Das Sonnenokular. Für Sonnenbeobachtung braucht man eine starke Schwächung des Lichtes. HERSCHEL⁴ benutzte die Reflexion des Lichts an der Vorderseite eines Glaskells unter etwa 45° , wobei als Objektiv ein unversilberter Glasparabolspiegel diente (Helioskop). PORRO⁵ ließ beim Spiegelfernrohr nach NEWTON das Licht an einem unversilberten Fangspiegel unter dem Polarisationswinkel reflektieren, dann an einem zweiten ebensolchen, durch Verdrehung der Spiegel zueinander wird die Helligkeit weiter abgeschwächt. BROWNING⁶ verwendet zweimalige Reflexion an solchen Glaskellen, MERZ⁷ zwei Spiegel in PORROScher Anordnung. CHRISTIE⁸ verwendet mehrmalige Spiegelung unter

¹ Cambr Phil Soc Trans 2, S 267, 3, S 1 (1827), Phil Mag (4) 25, S 155 (1863), MN 23, S 69 (1862)

² KERBER, Mechaniker 8, S 109 (1900), CONRADY, MN 78, S 445 (1918), TAYLOR, Trans Opt Soc 22, S 63 (1920/1)

³ Proc Cambr Phil Soc 4, S 324 (1883)

⁴ Results of the Observations at the Cape of Good Hope, S 436 1847, The Telescope, S 112 Edinburgh Black 1861

⁵ CR 46, S 133 (1858)

⁶ MN 33, S 58 u 59 (1873)

⁷ AN 66, S 175 (1866), Carls Rep 12, S 143 (1876)

⁸ MN 36, S 117 (1875)

dem Polarisationswinkel in Verbindung mit einem drehbaren Nikol PICKERING¹ benutzt die Spiegelung an der Kittschicht von zwei zu einem Würfel vereinigten rechtwinklig gleichschenkligen Prismen ZENGER² vermied die dabei auftretenden Doppelbilder, indem er die Prismen zusammensprengte, d. h. ohne Kitt aneinandepreßte, HILGER³, indem er ein Glas- und ein Flüssigkeitsprisma zu einem Würfel verband, THORP⁴ durch Verwendung eines absorbierenden

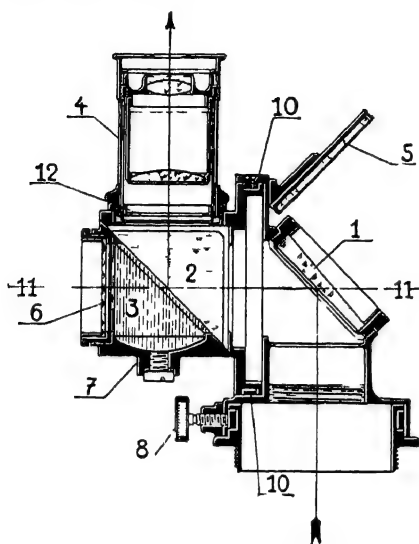


Abb 63 Das Sonnenokular nach COLZI

dunklen Kitts. PRAZMOWSKI⁵ verwendet einen HERSCHEL'Schen Keil in Verbindung mit zwei gekreuzten Würfeln COLZI⁶ einen Keil 1 und einen dagegen drehbaren HILGER'Schen Würfel 2, 3 (Abb 63), es sei auch auf Abb 3, S 62, im 4 Bände dieses Handbuchs verwiesen. Zur Änderung der Helligkeit dient auch vielfach ein Rauchglaskel.

47. Das Fernrohr für Meßzwecke

Das astronomische Fernrohr ist dadurch von besonderer Bedeutung geworden, daß es durch Anbringung von Marken, insbesondere eines Fadenkreuzes, in der Brennebene des Objektivs zum Feststellen von Richtungen geeignet wird.⁷ Die Visierlinie, auf der die Punkte liegen, die durch das Fernrohr mit dem Fadenkreuz in Deckung erscheinen, ist die Linie, die die Mitte der Eintrittspupille und die durch Rückstrahlung in den Dingraum abgebildete Fadenkreuzmitte miteinander verbindet, die Mitte der Eintrittspupille fällt gewöhnlich mit der Objektivmitte zusammen. Wird das Fadenkreuz in der Achsenrichtung verstellt und dadurch das Bild verschieden entfernter Gegenstände in der Fadenkreuzebene entworfen, so kann man als Visierlinie die Gerade ansehen, deren Bild mit der Verstellungsgeraden zusammenfällt. Um das Zielbild in die Ebene des Fadenkreuzes zu bringen, wird zunächst das Okular verschoben, bis das Fadenkreuz scharf ist, und dann das Fadenkreuz samt Okular gegen das Objektiv, bis auch das Bild scharf ist. Die letzte Einstellung wird genauer, besonders bei größerer Austrittspupille, wenn man darauf achtet, ob bei seitlicher Bewegung des Auges das Zielbild sich gegen das Fadenkreuz seitlich bewegt, ob Parallaxe vorhanden ist. Liegt das Zielbild um Δx vor oder hinter der Fadenkreuzebene, und ist der Öffnungswinkel der Strahlen $2u'$, so entsteht in der Fadenkreuzebene ein Zerstreuungskreis vom Durchmesser $2\Delta x \tan u'$. Wird das Auge nun seitlich bewegt, so wird durch die Augenpupille ein Teil der Austrittspupille abgeschnitten und damit auch von dem Zerstreuungskreis ein proportionales, ähnlich liegendes Stück. Der Schwerpunkt des Zerstreuungskreisrestes ist nun gegen die Mitte dieses Kreises verschoben und damit auch entsprechend der Bildort. Die beobachtete Parallaxe, der Abstand der äußersten Bildlagen, ist jedenfalls nur ein Bruchteil q des Durchmessers des Zerstreuungskreises, und zwar ein um so größerer, je größer der Durchmesser d

¹ Proc Amer Ac Febr 1871

² M N 45, S 60 (1884)

³ C R 79, S 33 (1874)

⁴ GASCOIGNE, Phil Trans 1667, S 161 u 195, HAMMER, Z f Vermess 25, S 513 (1896)

⁵ M N 37, S 439 (1876)

⁶ Engl Mech 77, S 372 (1903)

⁷ ZEISS, Gebrauchsmuster 369844 (1909)

der Austrittspupille ist, für $d = 0,6, 2, 5$ ist nach ENGI¹ $q = 1, 3, 3, 5, 4, 5$. Man kann die Parallaxe untersuchen, indem man einen Spalt über das Objektiv pendeln läßt, man ist dann von den Augenfehlern frei. Will man die Parallaxe genau feststellen, so macht man Zielungen mit Auge links und Auge rechts und vergleicht die Mittelwerte für diese Augenstellungen. Parallaxe kann auch durch Abbildungsfehler des Objektivs entstehen. Sphärische Abweichung gibt sich dadurch kund, daß für die angenähert beste Einstellung des Bildes bei Bewegung des Auges in einem Sinn das Bild dabei zum Fadenkreuz sich nicht immer in demselben Sinn mit oder gegen das Auge bewegt, sondern seinen Bewegungssinn umkehrt. Stärkerer Astigmatismus zeigt sich in verschiedener Parallaxe des waagerechten und senkrechten Fadens. Er ist meist auf schlechte Zentrierung oder Verspannung des Objektivs zurückzuführen, infolge Verspannung kann auch bei seitlicher Bewegung des Auges senkrechte Bewegung des Kreuzes eintreten. RAYLEIGH² fand den eben erkennbaren Einstellunterschied $\Delta x < \lambda \lg^2 u'$ (Ziff 26).

Bei Nacht braucht man vielfach künstliche Beleuchtung des Fadenkreuzes. Sind die beobachteten Ziele recht hell, so kann man das Gesichtsfeld aufhellen, indem man mitten vor das Objektiv eine kleinere beleuchtete schräge weiße Platte bringt³ oder wohl auch das Licht, das vom Ziel kommt, durch eine kleinere Mattscheibe zum Teil über das Gesichtsfeld ausbreitet. Sind aber die Ziele ziemlich lichtschwach, so muß das Fadenkreuz leuchtend gemacht werden. Dabei darf nur das von dem Fadenkreuz abgebeugte oder zurückgeworfene Licht, nicht das vorbeigehende blendende Licht in das Auge gelangen, auch muß die Beleuchtung zur Achse symmetrisch sein⁴. Am einfachsten erreicht man dies⁵ bei einem in Glas eingerissenen Kreuz, wenn die Glasplatte etwas dicker gewählt und der polierte Kreisrand bis auf einen Sektor für das seitlich einfallende Licht versilbert wird. Das Licht, etwa von einem elektrischen Lampchen, wird zwischen den Planflächen durch Totalreflexion hin und her geworfen und auch von dem Rande wieder zurück, so wird eine breite allseitige Beleuchtung erreicht, ohne daß Licht unmittelbar in das Auge gelangt, die Strichfurchen werden mit einer geeigneten weißen Masse eingelassen, unbeleuchtet erscheinen sie im durchfallenden Licht des Bildes trotzdem schwarz. Größere Marken können auch mit Radiummasse eingelassen werden, für feinere Striche ordnet man diese Masse ringförmig um die Glasplatte an. Man kann auch das Licht durch einen schrägen ringförmigen Reflektor, der das axiale Bildbuschel umgibt, von vorn zuführen, es muß dann das direkte Licht durch eine die Austrittspupille umgebende Blende abgehalten werden, wenn dies nicht schon etwa durch die Fassung der Umkehrlinse geschieht⁶. Für feinere Messungen ist dies auch bei den vorigen Anordnungen zweckmäßig, damit Fadenkreuz und Bild durch die gleichen Teile des Auges abgebildet werden.

Es seien endlich noch die Fadenbild- (Ghost-) Mikrometer kurz erwähnt, bei denen in der Brennebene des Fernrohrobjektivs ein helles Fadenbild entworfen wird. Am einfachsten erreichte dies FREINHEIL⁷, indem er vor dem Objektiv einen Kollimator mit kleinerer Öffnung anbrachte, während LAMONI⁸ das Fadenbild, das von einer Linse entworfen wird, mit einem schrägen, halbdurchlässigen Spiegel vor dem Brennpunkt des Objektivs hineinreflektierte. Bei

¹ Diss Zürich 1917² Phil Mag 20, S 354 (1885)³ GASCOIGNE Phil Trans 1667, S 161 u 195⁴ FORSTER, Z f Instrk 1, S 7 u 119 (1881)⁵ PORRO, CR 32, S 677 (1851)⁶ CZAPSKI, Z f Instrk 5, S 347 (1885), WRIGHT, J B A A 31, S 229 (1921)⁷ A N 5, S 359 (1827)⁸ Jahrb d Munch Sternw 1840, S 187

GRUBB und BURTON¹ (Abb 64) weiden die von dem Fadenkreuz c ausgehenden Strahlen b zuerst an einem Hohlspiegel d , dann an einem durchbrochenen Planspiegel e reflektiert und durch eine Linse f in der Brennebene g der vom Objektiv kommenden Strahlen a vor dem Okular vereinigt. Eine ähnliche An-

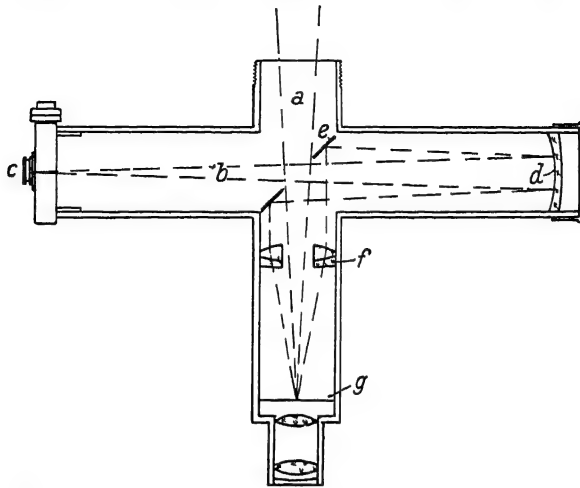


Abb 64 Das Ghost-Mikrometer von GRUBB und BURTON

Trotz eines neueren Versuchs in dieser Richtung bei dem Okular von R. KONIG und SARORI⁴ kommt es für allgemeinere Verwendung in der Astronomie nicht in Betracht. In dieser Art kann auch das AMICISche geradsichtige Dachprisma (Abb 70) als Richtmittel dienen, indem man das Auge in die Verlängerung der Dachkante bringt, so daß man im Vorbeisehen ein aufrechtes Bild und im Durchsehen ein umgekehrtes Bild erhält, die Visierlinie ist der Dachkante parallel.

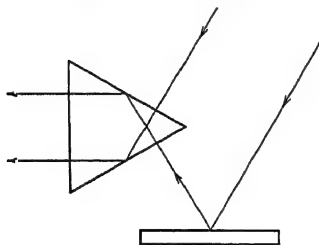


Abb 65
Das Prismenastrolabium

Sollen nur Seiten- (Hohen-) Winkel gemessen werden, so braucht das zweite Bild nur seiten- (hohen-) verkehrt zu sein, hierfür schlug AMICI sein Wendepisma vor⁵. Bei dem Diploidoskop zum Feststellen des Sterndurchgangs durch den Meridian wird so das eine Bild von einem einfachen Spiegel, das andere von einem Winkelspiegel geliefert. Die erste Form wurde von BLOXAM⁶ angegeben und von DENT ausgeführt, dem gleichen Zweck⁷ dient das Passageprisma von STEINHIL und das Prismenastrolabium von CLAUDE und DRIENCOURT⁸ (Abb 65), hier wird das eine Bild des Sterns durch

einen schwachen Doppelglaskern in einen Doppelstern verwandelt, in dessen Mitte das andere Sternbild genau eingestellt werden kann, während die Einstellung auf Zusammenfallen der Sternbilder erheblich ungenauer ist.

¹ M N 41, S 59 (1881)

² M N 92, S 72 u. 453 (1932)

³ Phil Trans 1779, S 130

⁴ Z f Instrk 29, S 315 (1909)

⁵ Mem Soc Modena 19, S 113 (1821)

⁶ Engl Patent 9793 (1843), ENCKE, A N 22, S 305 (1845), HEINLEN, Das Diploidoskop Dusseldorf Botticher 1847

⁷ STEINHIL, A N 24, S 270 (1846)

⁸ L'Astrolabe à prisme Paris Gauthier-Villars 1910, BARFR, J of Scient Instr 1, S 65 (1923/4)

48 Das Erdfernrohr Da das holländische Fernrohr nur für schwache Vergrößerungen in Betracht kommt, hat man bei starker vergrößernden Fernrohren ein aufrechtes Bild erreicht, indem man von dem umgekehrten Objektbild durch eine Linse ein zweites nochmals umgekehrtes, also aufrechtes, reelles Bild entwirft und erst dahinter das Okular anordnet. Ein solches Fernrohr wird als terrestrisches (Erd-) Fernrohr bezeichnet, das Okular samt Umkehrlinse als terrestrisches (Erdfernrohr-) Okular. In der einfachsten Form besteht es heute aus vier plankonvexen Linsen in größerem Abstand (Abb. 66). Die erste Linse ist eine Feldlinse, die nur schwach vergrößert, aber die Hauptstrahlen



Abb. 66 Ein einfaches Erdfernrohr-Okular

in kurzem Abstand vor der Umkehrlinse zur Kreuzung bringt, die hinteren Linsen bilden ein Okular nach HUYGENS. Die Abstände und Brennweiten der Linsen sind so gewählt, daß der Farbenunterschied der Vergrößerung gehoben ist. Das Okular zeigt außer der Achse befriedigende Bildscharfe und Verzeichnungsfreiheit, bei gehobenem Astigmatismus ist die Langsabweichung durch Bildkrümmung für $w = 18^\circ$ etwa $1/16$ der Brennweite, es besitzt aber in der Achse nicht unerhebliche chromatische und sphärische Unterverbesserung. Wo dies Okular immer mit demselben Objektiv benutzt wird, kann diese Unterverbesserung durch entgegengesetzte des Objektivs ausgeglichen werden. Angaben über ein Okular von COCK (1673) findet man bei BAXANDALL¹, über die Okulare DOLLONDS bei SCHERFFER², über die FRAUNHOFERS bei PRECHTL und v. ROHR³. Die Daten eines Okulars der letzten Art sind im Sinne der Lichtrichtung gezählt für die Brennweiten $f_1 = 54$, $f_2 = 69,5$, $f_3 = 67$, $f_4 = 43$ und für die Linsenabstände gerechnet von den Hauptpunkten $a_1 = 76$, $a_2 = 138$, $a_3 = 66$ bei einer Gesamtbrennweite von $F = 25$.

Kleinere Handfernrohre sind für den Transport zusammenschiebbar (Zugfernrohre). Während man gewöhnlich andere Vergrößerung durch Wechseln der Okulare erreicht, kann sie beim terrestrischen Okular auch durch Verschiebung von Linsen in der Achse erreicht werden⁴,

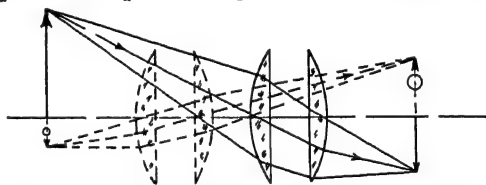


Abb. 67 Der Strahlengang im Umkehrsystem eines pankratischen Fernrohrs

man hat so in stetigem Übergang alle Zwischenvergrößerungen zur Verfügung. Damit das Bild bei der Verstellung ohne Nachstellung des Okulars scharf bleibt, müssen mindestens zwei Linsen oder Linsengruppen in Kupplung durch geeignete Mechanismen verschoben werden, und zwar am besten innere Linsen, damit das Okular stehenbleiben kann⁵. Es werden so entweder die Feldlinse und die Umkehrlinse verschoben, oder die Umkehrlinse besteht aus zwei für sich verschiebbaren Teilen (Abb. 67), die verschobenen Linsen müssen achromatisch sein. Ein solches Fernrohr mit veränderlicher Vergrößerung nennt man pan-

¹ BAXANDALL u. COURT, Proc. Opt. Convention 2, S. 529 (1926)

² Institutionum opticarum pars sec. Vindobonae Trattner 1775

³ Praktische Dioptrik, S. 276. Wien: Heubner 1828, v. ROHR, Fraunhofers Leben Leipzig: Akad. Verlagsges. 1929

⁴ CAUCHOIX, Franz. Patent 1745 (1815)

⁵ SCHRODER, Z. f. Instr. 10, S. 133 (1890), ERFLE, ebenda 41, S. 107 (1921), DUNOYER, Rev. d'Opt. 3, S. 353 (1924)

kratisch Beim Erdfernrohr mit maßiger Vergrößerung kann auch das Objektiv aus einer einfachen Linse hergestellt und die Farbenabweichung im Umkehrsystem ausgeglichen werden, diese Bauart bietet aber keine praktischen Vorteile¹

49 Das Prismenfernrohr Statt durch Zwischenschalten eines Linsen-umkehrsystems wird heute das Bild des astronomischen Fernrohrs meist durch

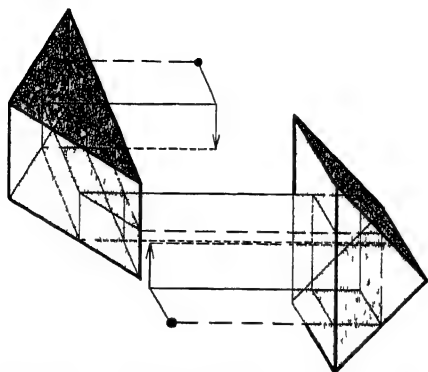


Abb 68 Ein Porrosches Umkehrprisma erster Art

aus einem rucksichtigen Doppelspiegel mit waagerechter und einem mit senkrechter Spiegelachse. Bei jedem entsteht das Bild durch Drehen des Gegen-

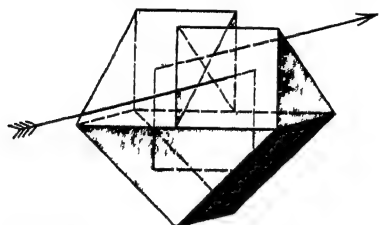


Abb 69 Ein Porrosches Umkehrprisma zweiter Art

standes um die Spiegelachse, die Schnittgerade der Spiegel, um 180° , die beiden Drehungen setzen sich zu einer solchen um 180° um die zu beiden Achsen senkrechte, also um die Blicklinie, zusammen. Bei der gezeichneten Lage kehrt der Doppelspiegel mit waagerechter Spiegelachse das Bild um, der andere bringt nur das Bild in die andere Richtung. Beim Einschalten dieses Prismensystems zwischen Objektiv und Okular findet eine starke Verkürzung des Fernrohrs statt,



Abb 70 Ein geradsichtiges Dachprisma

allerdings wird der Querschnitt größer (Abb 78). Das Prismenfernrohr war berufen, die Lücke zwischen dem holländischen Fernrohr (Ziff 50), das sich nur für schwache Vergrößerung eignet, und dem Erdfernrohr, das sich mehr für stärkere Vergrößerungen eignet, auszufüllen. Es hat sich namentlich als Handdoppelfernrohr mit Vergrößerung von 3- bis 18fach eingebürgert, nachdem es ABBI² gelungen war, die Schwierigkeiten der Glasbeschaffung und der technischen Herstellung zu überwinden. Ein zweites von PORRO angegebenes Prismensystemfernrohr (Abb 69) findet besonders für stärkere Vergrößerung Verwendung. Endlich sind noch die sog Dachprismen zu erwähnen. Die beiden Spiegel des Doppelsprismas von DELABORNE (Ziff 5) können an einem bildumkehrenden Prisma verkörpert werden (Abb 70). Ist der Spiegelwinkel genau 90° , so ist

Einschalten von bildumkehrenden Prismensystemen in den Strahlengang ausgerichtet. Wir haben in Ziff 5 ein solches Prismensystem kennengelernt, das aus zwei Wendepismen besteht, dieses hat aber den Nachteil, daß es infolge der Brechung des Achsenstrahls an den Ein- und Austrittsflächen nicht zwischen Objektiv und Okular verwendet werden kann. Bei der gebräuchlichsten Form nach PORRO² findet eine viermalige Reflexion statt (Abb 68). Je zwei Prismen werden als ein Stück hergestellt, sie sind hier nur zur deutlichen Darstellung des Strahlenganges getrennt. In der dargestellten Lage besteht das Prismensystem

eine starke Verkürzung des Fernrohrs statt, allerdings wird der Querschnitt größer (Abb 78). Das Prismenfernrohr war berufen, die Lücke zwischen dem holländischen Fernrohr (Ziff 50), das sich nur für schwache Vergrößerung eignet, und dem Erdfernrohr, das sich mehr für stärkere Vergrößerungen eignet, auszufüllen. Es hat sich namentlich als Handdoppelfernrohr mit Vergrößerung von 3- bis 18fach eingebürgert, nachdem es ABBI²

¹ HASERT, Dtsch R. Patent 20729 u 43377 (1882/7), SCHRODIER, Z 1 Instrk 6, S 41 (1886)

² Engl Patent 2377 (1854) Franz Patent 19050 (1857)

³ CZAPSKI, Verh d Ver z Beford d Gewerbefl 1895, S 39, Centi / 1 Opt u Mech 17, S 1 (1896), Dtsch Mech Z 5, S 49 (1895)

das Bild des Prismas dasselbe, in welcher Reihenfolge auch die Spiegelungen erfolgen, da in jedem Fall das Bild um die Spiegelachse um 180° gedreht ist. Ein solches Prisma nennt man ein Dachprisma. Wegen des schrägen Durchtritts eignet sich dieses Prisma nach AMICI¹ aber nicht für die Verwendung zwischen Objektiv und Okular. Wird aber die Ablenkung durch Brechung an den Durchtrittsflächen durch solche in Spiegelprismen ersetzt, so erhält man ein brauchbares Umkehrprisma. Die Ablenkung an dem Dach kann nun in verschiedener Weise durch eine gerade Anzahl zusätzlicher Spiegelungen ergänzt werden (Abb 71). Gedrungte Bauart gibt das Umkehrprisma nach MÖLLER² mit sechs Spiegelungen (Abb 72). Durch die Verwendung der Dachprismen erhält der Prismenfeldstecher eine flache Form, allerdings verlangt das Prisma eine Einhaltung des 90° -Winkels bis auf Sekunden, da sonst die auftretenden Doppelbilder die Bildscharfe beeinträchtigen wurden.

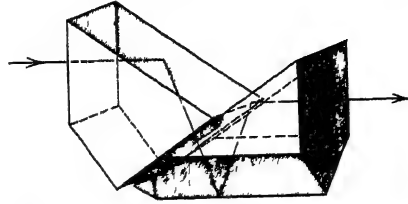


Abb 71 Ein Umkehrprisma nach ABBE

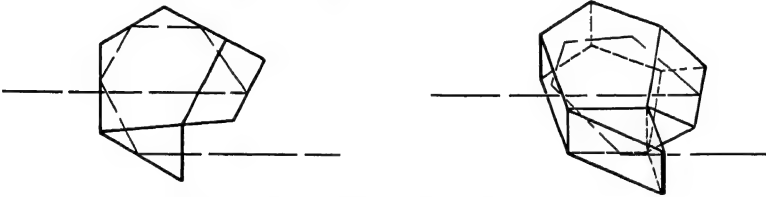


Abb 72 Ein Umkehrprisma nach MÖLLER

50 Das holländische Fernrohr Das sammelnde Objektiv gibt ein umgekehrtes Bild, das durch das zerstreue Okular nochmals umgekehrt wird und so aufrecht erscheint. Es ist heute nur für schwache Vergrößerung in Gebrauch.

Betrachtet man das Fernrohr für sich, so ist das Objektiv oder eine Blende in dessen Nähe Öffnungspupille, die Austrittspupille des Fernrohrs ist daher virtuell, so daß das Auge nicht an ihren Ort gebracht werden kann. Es ist nun zu unterscheiden, ob die Austrittspupille größer oder kleiner als die Augenpupille ist. In dem ersten, gewöhnlich vorliegenden Falle (Abb 73), auf den wir

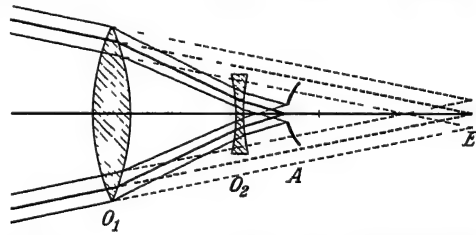


Abb 73 Der Strahlengang beim holländischen Fernrohr

allein näher eingehen wollen, ist die Austrittspupille des Fernrohrs Gesichtsfeldblende, die Augenpupille A Öffnungsblende, worauf LUBIMOFF³ hingewiesen hat, die älteren Lehrbücher geben eine falsche Darstellung. Das Fernrohr zeichnet sich so durch große Lichtstärke aus, da die Augenpupille auch bei schlechtem Licht unvermindert wirksam ist, dazu kommt noch, daß die Reflexionsverluste gering sind, da gewöhnlich nur vier Grenzflächen gegen Luft vorhanden sind, dem steht entgegen, daß die größte Helligkeit nur in der Mitte des Gesichtsfeldes vorhanden ist, und daß besonders bei starker Vergrößerung schon nicht weit von der Mitte die Helligkeit bis zum Rande des Gesichtsfeldes abfällt. Für das Folgende nehmen

¹ NACHET C R 17, S 917 (1843)² Dtsch R Patent 358868 (1920)³ Pogg Ann 148, S 405 (1873), CZAPSKI, Z f Instr 7, S 409 (1887), 8, S 102 (1888)

wir an, daß die Fassung des Objektivs O_1 das Gesichtsfeld begrenzt. Das vom Okular O_2 entworfene virtuelle Bild der Fassung liegt nun so dicht vor dem Auge, daß die Begrenzung recht unscharf erscheint. Der Winkel, unter dem die Augenpupille von dem Blendenbild aus erscheint, ist die Winkelbreite der Ringzone abfallender Helligkeit, in ihr fällt die Helligkeit von dem Höchstwert, der für das Gebiet innerhalb des inneren Kreises der Ringzone durchweg gilt, allmählich auf Null ab. Der mittlere Kreis der Ringzone ist durch die Hauptstrahlen bestimmt, die durch die Gesichtsfeldblende gehen. Man kann diese Erscheinung auch dadurch erklären, daß für die Punkte des inneren Kreises des Gesichtsfeldes die vollen Bündel aufgenommen werden, und je weiter der Bildpunkt in die unscharfe Zone rückt, um so größere Teile des Bündels durch den Rand des Objektivs abgeblendet werden. Die Stelle, wo der Helligkeitsabfall einsetzt, hebt sich durch Kontrastwirkung als heller Ring ab. Es möge nun gezeigt werden, wovon die Größe des Gesichtsfeldes abhängt, wenn man es bis zur Mitte der Ringzone rechnet, das dingsseitige Gesichtsfeld ist dann durch den Winkel gegeben, unter dem das Objektiv O_1 von der Eintrittspupille E erscheint. Bisher wurde der Kreuzungspunkt der Hauptstrahlen in der Augenpupille angenommen. Dies gilt aber nur für das Sehen mit ruhendem Auge, das indirekte Sehen, wie es namentlich zur Orientierung dient. Gewöhnlich wird auch das Gesichtsfeld für diesen Fall angegeben. Für jede genauere Beobachtung wird aber das Auge rasch, meist ohne daß es zum Bewußtsein kommt, mit seiner Visierlinie über den betrachteten Gegenstand hinweggeführt, da außerhalb der Netzhautgrube die Sehstärke stark abfällt. Bei diesem direkten Sehen liegt aber der Kreuzungspunkt der Hauptstrahlen im Augendrehpunkt, in dem man sich die Augenpupille zurückgeschoben denken kann. Es ist daher auch der Augendrehpunkt für das scharfe Übersehen des Gesichtsfeldes maßgebend. Bezeichnet man nun den Abstand des Kreuzungspunktes A der Hauptstrahlen im Bildraum vom hinteren Hauptpunkt des Okulars mit a , so ist der Abstand vom hinteren Brennpunkt F' des Okulars $a - f$ und der Abstand der Eintrittspupille E von dem F' zugeordneten Bildpunkt, dem vorderen Objektivbrennpunkt F_1 durch $F_1' (a - f)$ und der vom vorderen Hauptpunkt des Objektivs durch $F_1' (a - f) : F$ gegeben. Führt man die Fernrohrlänge $l = F - f$ ein, so ist der Abstand $F_1' (aF + l)$. Bezeichnet man den Objektivdurchmesser mit D und den halben dingsseitigen Gesichtsfeldwinkel mit w , so ist

$$\operatorname{tg} w = \frac{D}{2F(aF + l)} \quad (77)$$

Für das bildseitige Gesichtsfeld gilt $\operatorname{tg} w' = F \operatorname{tg} w$. Das praktisch erreichbare bildseitige Gesichtsfeld wird mit starkerer Vergrößerung immer kleiner und ist auch bei schwacher Vergrößerung kleiner als beim astronomischen Fernrohr. Daten für holländische Fernrohre nach DOLLOND, FRAUNHOFER und PRIZZI veröffentlichte v. ROHR¹. Über GALILEIS Fernrohre und ihre Prüfung siehe ABETTI u. a.² Bei einem erhaltenen Fernrohr betrug der Durchmesser des Objektivs 5,8, seine Brennweite 168,9 cm, die Vergrößerung war 18fach.

51. Die dünne Sammellinse mit fernrohrähnlicher Wirkung. Es sei hier noch kurz erwähnt, daß auch eine einfache Sammellinse langer Brennweite wie ein Fernrohr vergrößernd wirken kann³, wenn man das für die Nahe akkommodierte Auge in solchen Abstand hinter die Brennebene bringt, daß das Bild

¹ Phot. Korr. 43, S. 266 (1906), J. Fraunhofers Leben, Leistungen u. Wirksamkeit Leipzig: Akad. Verlagsges. 1929.

² L'Universo 4, Nr. 9 (1923), Ciel et Terre 40, S. 12 (1924), RONCHI, L'Universo 4, Nr. 10 (1923), BAXANDALL, Trans. Opt. Soc. 25, S. 141 (1923/4).

³ DICK, Practical Astronomer, S. 232 u. 332. London: Seely 1845.

deutlich wird, ein übersichtiges Auge ist in den entsprechenden Abstand davorzubringen, nur dieses erhält ein aufrechtes Bild. Die Vergrößerung ist gleich der Brennweite der Linse dividiert durch den Abstand des Auges von ihrem Brennpunkt. Der Strahlengang ähnelt dem beim holländischen Fernrohr, die Hauptstrahlen kreuzen sich im Augendrehpunkt, der Linsenrand begrenzt das kleine Gesichtsfeld. Statt der Linse kann auch ein Hohlspiegel benutzt werden. Indem HERSCHEL ohne Okular mit freiem Auge in den Spiegel eines großen Fernrohrs hineinsah, konnte er einen Saturnmond erkennen, in ähnlicher Weise sollen die Araber im Mittelalter vom Leuchtturm von Alexandria aus die ankommenden Schiffe beobachtet haben¹. Es kann heute wohl als sicher gelten², daß die angeblichen Vorgängerschaften LIPPERSHEYS solche Fernrohre betreffen, aber erst durch seine Erfindung wurde die Bahn zur fortschreitenden Entwicklung des Fernrohrs eröffnet.

52 Das Doppelfernrohr Das beidäugige Sehen bietet den Vorteil, daß die Tiefengliederung unmittelbar auf Grund der Verschiedenheit der Bilder in den beiden Augen erkannt wird, die darauf beruht, daß der Standpunkt des einen Auges von dem des anderen etwas verschieden ist. Es lassen sich allerdings nur Entfernungsdifferenzen von nahe in der gleichen Blickrichtung liegenden Gegenständen erkennen,

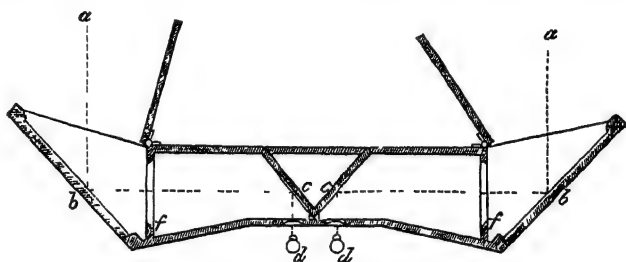


Abb 74 Das Telestereoskop von HELMHOLTZ

bei größerem seitlichem Winkelabstande der zu vergleichenden Punkte nimmt die Genauigkeit des Erkennens von Entfernungsdifferenzen rasch ab. Die Genauigkeit nimmt außerdem mit dem Quadrate der Entfernung des Gegenstandes ab. Die Genauigkeit der Tiefenwahrnehmung wird durch Vergrößerung des Augenabstandes gesteigert, diese Wirkung kann man mit dem Telestereoskop von HELMHOLTZ³ erreichen (Abb 74). Bei diesem werden die Strahlen durch zwei rhombische Doppelspiegel bc versetzt. Man erhält denselben Eindruck, als wenn sich die Augen dd auf den Geraden ab um die Strecken bcd hinter b befänden. Ist also in Abb 75 ac der Abstand der äußeren Spiegel und I, II, III, IV, V der Gegenstand, so erhalten die Augen im Abstand ab gleich ac/n als Bild das n mal verkleinerte Modell 1, 2, 3, 4, 5. Die Tiefendimensionen sind in diesem Modell zwar n mal verkleinert, aber, da es im n fachen kleineren Abstand geboten wird und die Genauigkeit so n^2 mal gesteigert ist, werden die Tiefenunterschiede n mal genauer erkannt. Die Wirkung eines gewöhnlichen Doppelfernrohrs, bei dem Objektiv- und Okularachse zusammenfallen, läßt Abb 76 erkennen, die Sehwinkel werden durch das Fernrohr Γ mal vergrößert, und man erhält

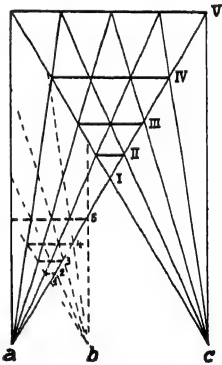


Abb 75 Das Raumbild bei vergrößertem Augenabstand der Eintrittspupille

¹ LIBRI, Histoire des sciences mathematiques en Italie, Bd 1, 2. Aufl. S. 215. Halle Schmidt 1865.

² BAXANDALL, Trans Opt Soc 24, S. 304 (1922/3), v. ROHR, Centr Z f Opt u Mech 45, S. 66 (1924).

³ Pogg Ann 102, S. 167 (1857), Phil Mag 15, S. 19 (1858), HARDY, ebenda 15, S. 156 (1858).

das Raumbild (1) (2) (3) (4) (5), das für $\Gamma = n$ in den Tiefenverhältnissen mit dem Modell 1, 2, 3, 4, 5 übereinstimmt, so daß auch hier die Tiefenwahrnehmung Γ mal größer ist, die Querdimensionen sind aber vergrößert¹. Das Bild ist nicht raum-

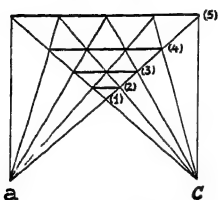


Abb 76 Das Raumbild bei Fernrohrvergrößerung

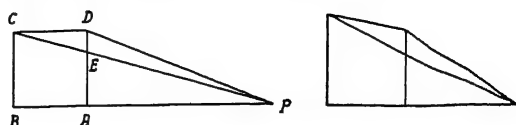


Abb 77 Die Änderung der Raumvorstellung durch das Fernrohr

richtig (orthomorph), sondern raumverzerrt (heteromorph). Die Gegenstände erscheinen so kullissenartig in der Schichtung zusammengedrängt, es

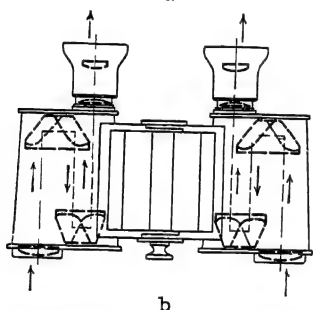
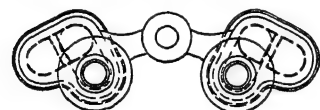


Abb 78 Ein Prismendoppelfernrohr nach ABBE

Ist diese Steigerung das n -fache, so ist die Tiefenunterscheidung n mal gesteigert, man bezeichnet n als spezifische Plastik, Γn als totale Plastik des Fernrohrs.

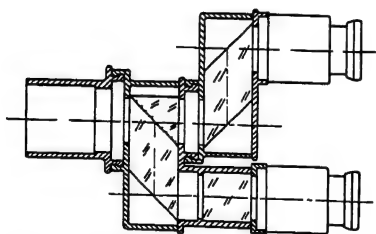


Abb 79 Ein Okular für beidäugigen Gebrauch

Für astronomische Beobachtungen mit stärkeren Vergrößerungen kommen Doppelfernrohre kaum in Betracht, man hat wohl auch solche ähnlich den Aussichtsfernrohren von Zeiß mit 110 und 130 mm Öffnung mit Erfolg benutzt, die Kosten stehen aber in keinem Verhältnis zum Vorteil². So sind auch die Vorschläge von VALIACK³ und GOETZSCH⁴ unbeachtet geblieben. THORNIHWAHL⁵ hat die Strahlen vor der Brennebene durch einen halbdurchlässigen Spiegel zum Teil abgelenkt

¹ PULFRICH Z f Instrk 23, S 133 (1903)

² v ROHR, Munch Ak Ber 36, S 487 (1906), D optischen Instrumente Leipzig Teubner 1906

³ Dtsch R Patent 77086 1893

⁴ MN 8, S 139 (1848)

⁵ MN 37, S 3 (1876)

⁶ EDGEComb, Pop Astr 10, S 523 (1902)

⁷ Z f Instrk 1, S 105 (1881)

und in ein zweites zum ersten paralleles Okular gelenkt, ähnlich verfährt Zeiß¹ (Abb 79). Die beidäugige Beobachtung ermüdet die Augen weniger und erleichtert die räumliche Vorstellung.

Damit beim Sehen durch ein binokulares Fernrohr kein Augenzwang eintritt, müssen folgende Forderungen erfüllt sein. Die optischen Achsen, d. h. die Verbindungslinien der zugekehrten Hauptpunkte von Objektiv und Okular, müssen parallel sein, da die Augen besonders gegen einen Hohenfehler der Bilder empfindlich sind, die Bilder müssen gleich groß sein und keine Verdrehung gegeneinander zeigen.

53 Der Hohlspiegel als Objektiv Wie oben gezeigt wurde, ist die Abbildung durch einen hohlen bzw. erhabenen Spiegel der durch eine sammelnde bzw. zerstreue Linse verwandt. Schon bald nach der Erfindung des Fernrohrs erkannte man daher, daß man bei Fernrohren insbesondere das Objektiv durch einen Hohlspiegel ersetzen kann, diese Bauart war vor Erfindung des achromatischen Objektivs dem Linsenfernrohr für starke Vergrößerungen weit überlegen, sie konnte sich aber erst durchsetzen, als die Technik des Schleifens der schwierigeren Herstellung des Hohlspiegels gewachsen war. Was die monochromatische Abweichung des Kugelhohlspiegels mit der Eintrittspupille in der Scheitelebene betrifft, so ergibt die SEIDELSche Näherungstheorie für die tangentielle und die sagittale Komponente δ_t und δ_s der Seitenabweichung in der Brennebene, wenn u'_t und u'_s die Komponenten des halben Öffnungswinkels u' sind, w die Hauptstrahlenneigung und r der Krümmungsradius des Spiegels ist,

$$\frac{2\delta_t}{r} = \frac{u'^2 u'_t}{8} + \frac{(3u'^2 + u'^4)w}{4} + u'_t w^2, \quad (78)$$

$$\frac{2\delta_s}{r} = \frac{u'^2 u'_s}{8} + \frac{u'_t u'_s w}{2} \quad (79)$$

Die sagittale Bildkrümmung und die Verzeichnung sind gleich Null. Der Radius der tangentialen Bildkrümmung ist $-F/4$. Die sphärische Seitenabweichung in der Achse $u'^3 r/16$ ist ein Achtel von der einer einfachen Linse bei gleicher Form und beträgt für einen Spiegel von $D = 100$ und $F = 1000$ mm nur 0,016 mm, wächst aber rasch mit größerem Öffnungsverhältnis. Nach Ziff 31 ist der schädliche Einfluß $u'^4 F$ proportional. Durch eine dieser GröÙe proportionale Flächenabweichung in Richtung des Kugelradius kann die sphärische Abweichung gehoben werden. In der Tat ist die Abweichung des Umdrehungsparaboloids gegen die Kugel bei kleiner Öffnung dieser GröÙe proportional. Das Paraboloid ist daher auch für große Öffnung und fernen Dingpunkt frei von sphärischer Abweichung. Bei einem Spiegel von $D = 2,58$, $F = 12,88$ m ist die Abweichung des Paraboloids von der Kugel am Rande etwa 20μ . Im übrigen ergibt die SEIDELSche Theorie dieselben anderen Bildfehler für diese Flächenform wie für die Kugel. In Abb 23 sind die Zerstreuungsfiguren außer der Achse in der Brennebene des Parabolspiegels wiedergegeben. Abb 80a zeigt das entsprechende photographierte Sternbild im Vergleich mit solchen bei photographischen Objektiven.

Es soll noch untersucht werden, bei welchen Durchmessern und Brennweiten die sphärische Abweichung in der Achse beim Kugelspiegel noch unschädlich ist. Nach Ziff 31 ist für die RAYLEIGHsche Grenze bei einer Definition von 80%

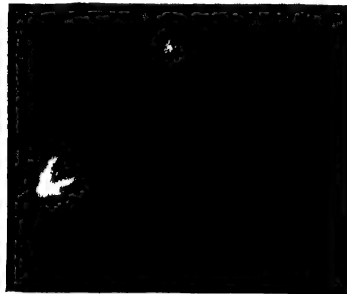
$$a_r = \frac{4\lambda}{\sin^2 u'} = \frac{16\lambda F^2}{D^2}, \quad (80)$$

wo a_r die sphärische Langsabweichung in der Achse für den Spiegelrand ist. Da nun $a_r = D^2/32F$ ist, ergibt sich für $\lambda = 0,55 \mu$ die Beziehung $F^3 = 3,55 D^3$, wo D und F in mm zu nehmen sind. Für $D = 100$ bzw. 300 mm ist also $F = 710$

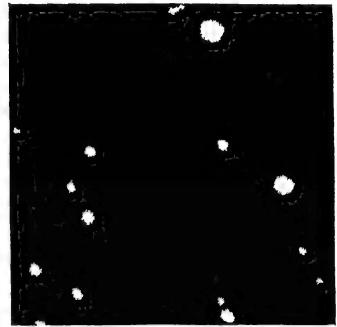
¹ SEITZ, Die Sterne 1, S. 84 (1921/2)

bzw 3060 zu nehmen. Die gleiche Regel mit einer größeren Konstanten gab schon SMITH¹ auf Grund der geometrischen Optik, indem er ähnlich wie bei der Farbenabweichung Ziff 39 verfuhr.

Als Werkstoff diente früher Spiegelmetall, Legierungen von Cu, Zn, Sn, mit etwa 64% Reflexionsvermögen. Neuerdings, seit STEINHEIL² das LIEBIGSCHE Verfahren zur Versilberung einfuhrte, verwendet man auf der Vorderfläche versilberte Glasspiegel, in frischem Zustande erreicht man bis zu 96% Reflexionsvermögen. Es wird Vorsorge getroffen, daß der Spiegel leicht neu versilbert werden kann. Das Verfahren findet man in den Anleitungen zu Selbstherstellung von Spiegelteleskopen (Ende von Ziff 60) und in Zeitschriften³ be-



a



c



b

Abb 80 Sternbilder außer der Achse a) des Parabolspiegels ($D = 1000$, $f = 3000$, $w = 1^\circ, 8$), b) des PETZVALschen Objektivs ($D = 160$, $F = 800$, $w = 7^\circ$) c) eines deformierten Triplets ($D = 300$, $f = 1500$, $w = 5^\circ, 2$)

schrieben. Abb 81 stellt das Reflexionsvermögen verschiedener Metalle in Abhängigkeit von der Wellenlänge dar⁴, Abb 82 das von Silber und Stahl für verschiedene Einfallswinkel. Der Glasspiegel zeichnet sich durch geringeres Gewicht aus, die größere Gleichmäßigkeit des Gefüges und Blasenfreiheit begünstigen die genaue Flachengebung und die saubere Politur. Der Hohlspiegel hat namentlich bei großen Abmessungen manche Vorteile vor dem Objektiv, so kommt es, daß das größte Spiegelfernrohr eine Öffnung von $2\frac{1}{2}$ m Durchmesser gegenüber dem größten Linsenfernrohr von 1 m Durchmesser hat. Es ist leichter,

¹ A Compleat System of Opticks S 146 Cambridge Clowndfield 1738 Übersetzt von KASTNER S 191 Altenburg Richter 1755

² Augsb Allg Z 24 März 1856, A N 48, S 145 (1858), M N 19, S 56 (1858), BOUCAU 1, C R 44 S 339 (1857)

³ LIEBIG, Ann d Chemie u Pharmazie 98, S 132 (1856), DINGLERS Polyt J 140, S 204 (1856), MARTIN, Ann d Chemie et de Phys 15, S 94 (1898), DINGLERS Polyt J 191, S 43 (1869), WADSWORTH, Ap J 1, S 252 (1895), CURTIS, Publ A S P 23, S 13 (1911), MIEHL, Eders Jahrb 27, S 191 (1913), SILVERMAN u NECKERMAN, Trans Amer Ceramic Soc 27, S 351 (1919), übersetzt Centr Z f Opt u Mech 41, S 107 (1920), Circular 32, Bureau of Standards, The Physical Society of London and the Optical Society, A Discussion on the Making of Reflecting Surfaces London Fleetway Press 1920, übersetzt von KALLENBACH, Centr Z f Opt u Mech 46 S 186 (1925)

⁴ COBLENTZ u a, Bull Bur of Stand 2, S 472 (1907), 7, S 198 (1911), Sc Pap Bur of Stand 2, S 343 (1929), 4, S 189 (1930), HULBURT, Ap J 42, S 203 (1915), 46, S 1 (1917)

eine für den Spiegel geeignete Glasscheibe zu beschaffen, da es nur auf Spannungs- und Blasenfreiheit des Glases ankommt, auf Durchsichtigkeit und Schlieren-

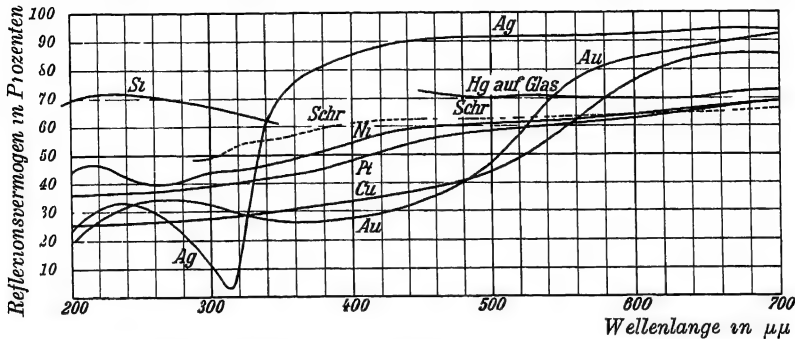


Abb 81 Das Reflexionsvermögen einiger Metalle für verschiedene Wellenlängen Schr SCHRODERSCHES Spiegelmetall (66 Cu + 22 Sn + 12 Zn)

freiheit wie bei der Linse aber nicht Auch das Schleifen ist trotz der Abweichung von der Kugelform bei nur einer Fläche billiger Während das Lickobjektiv von 96 cm Durchmesser 50000 Dollar kostete, betrug der Preis der Spiegel für das Victoriafernrohr (Hauptspiegel 184 cm, Fangspiegel 51 cm) nur 32000 Dollar, wobei das Steigen des Preises mit der zweiten Potenz des Durchmessers und die Geldentwertung zu berücksichtigen sind Da das Spiegelfernrohr ein größeres Öffnungsverhältnis zuläßt, ist das Rohr kürzer, die Kosten von Montierung und Kuppel werden geringer Andererseits ist der Spiegel gegen Abweichungen von der richtigen Form bei der Bearbeitung viermal so empfindlich Auch Formänderungen infolge Durchbiegung und ungleicher Erwärmung sind erst recht beim Spiegel gefährlicher (Ziff 54) Die Leistung des großen Spiegelfernrohrs auf Mt Wilson kann nur ausgenutzt werden, wenn die Temperatur auf 1° konstant gehalten wird So kommt es, daß das Linsenfernrohr feinere Doppelsterne auflöst

Der Spiegel ist frei von sekundärem Spektrum, das bei wachsender Größe des Linsenfernrohrs immer störender wirkt Das bedeutet bei größerem Spiegel auch einen merklichen Helligkeitsgewinn Da Farben besser erkannt werden, eignet sich der Spiegel besonders zur Beobachtung von Planetenoberflächen FOUCAULT¹ bemerkt allerdings, daß er zarte Streifen auf dem Jupiter mit dem Linsenfernrohr besser erkennen konnte, der Helligkeitsunterschied war nicht mehr merklich, wohl aber der Farbenunterschied infolge des sekundären Spektrums Ferner hat sich der Spiegel für das Studium von Nebeln bewährt Spektroskopische Arbeiten sind erleichtert, da eine Neueinstellung für andere Stellen des Spek-

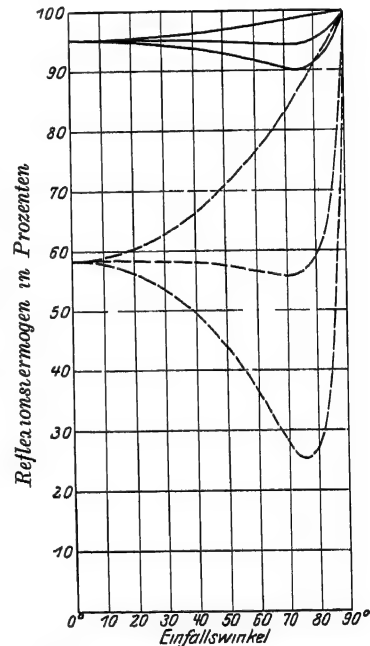


Abb 82 Das Reflexionsvermögen von Silber (---) und Stahl (—) für verschiedene Einfallswinkel, obere und untere Kurve die senkrecht zueinander polarisierten Anteile

¹ Recueil des travaux scientifiques, S 296 Paris Gauthier-Villars 1878

trums unnötig ist. Der Spiegel ist gleich gut in derselben Ausföhrung für Beobachtung wie für Photographie geeignet. Ebenso eignet er sich für die Untersuchung der Wärmestrahlen und für die der ultravioletten Strahlen, die vom Glas stärker absorbiert werden. Für die letzte Strahlenart sind Spiegel aus Platin, Nickel¹ und Spiegelmetall sowie mit Silizium überzogene² besser als versilberte, da Silber in der Nähe der Wellenlänge $300 \mu\mu$ geringeres Reflexionsvermögen besitzt. Dafür ist es in dünner Niederschlag auf einem Objektiv kann dazu dienen, diese Strahlen für die Untersuchung auszuordern³. Magnesiumniederschlag auf Quarz zeigt bei $0,25 \mu$ 80% Reflexionsvermögen⁴. Ein Aluminiumniederschlag, der durch Verdampfen im Vakuum erzeugt wird und ziemlich haltbar sein soll, reflektiert bei $\lambda = 0,357 \mu$ 70%, bei $0,305 \mu$ 64% und bei $0,251 \mu$ 53%⁵. Für Messungen ist das Linsenfernrohr überlegen, da eine Kippung des Spiegels die Visierlinie ändert, auch Rohrverbiegung infolge unscitiger Erwärmung die Visierlinie mehr ändert, und da beim Spiegel die unsymmetrischen Zerstreuungs-



Abb 83 Das extrafokale Sternbild eines Parabolspiegels mit Markierung der Mitte durch eine Blende

figuren der Bildpunkte außer der Achse eine genaue Einstellung hindern. Bei hellen Sternen kann man sich allerdings durch geeignete Blenden vor dem Objektiv helfen, die die vom Hauptstrahl getroffene Stelle der Zerstreuungsfigur hervorheben, Abb 83 zeigt eine solche Sternaufnahme⁶. Ein Spiegel von gleichem Durchmesser und gleicher Brennweite wie die Normalfernrohre für die photographische Himmelskarte ($D = 340$, $F = 3400 \text{ mm}$) zeigt bei dem gleichen Gesichtsfeld von $2,8^\circ$ keine größeren Zerstreuungsflecken als dieses Fernrohr, die Bilder sind aber für die Ausmessung weit weniger geeignet. Infolge der Koma wird bei n facher Vergrößerung des Öffnungsverhältnisses das brauchbare Bildfeld n^2 mal kleiner, während beim einfachen Fernrohrobjektiv infolge von Bild-

krümmung und Astigmatismus das Bildfeld bei n mal größerem Öffnungsverhältnis nur \sqrt{n} mal kleiner wird. Trotzdem hat man den Spiegel für Öffnungsverhältnisse bis $1 \frac{1}{2}$ und mehr für photographische Zwecke verwandt (S 132), ein Objektiv mit diesem Öffnungsverhältnis mußte aus drei Linsen zusammengesetzt werden und hatte zu starkes sekundäres Spektrum und zu große Reflexions- und Absorptionsverluste. Die Frage, ob das Spiegel- oder das Linsenfernrohr sich für bestimmte Aufgaben mehr eignet, ist immer wieder erörtert worden⁷.

54 Formänderungen durch Schwere und Wärme Mit der Durchbiegung des Spiegels durch das eigene Gewicht hat sich besonders COUDER⁸ beschäftigt. Zunächst stellte er fest, daß man unter den vorkommenden Verhältnissen die

¹ WOOD, Ap J 34, S 404 (1911)

² SIEMENS u. HALSKE, Dtsch R Patent 352156 (1920)

³ FOUCAULT, C R 63, S 413 (1866), SCHWARZSCHMID u. VILHIER, Phys Z 6, S 737 (1905) Ap J 33 S 284 u 345 (1906), WOOD, M N 70, S 226 (1910)

⁴ Phys-techn. Reichsanstalt, Z f Instr 46, S 176 (1920)

⁵ WILLIAMS u. SABINE, Ap J 77, S 317 (1933)

⁶ PREY, Wiener Ak Ber 123, S 1859 (1914), 127, S 2253 (1918), HIPPERGER, Wiener Anz S 343 (1918)

⁷ FRAUNHOFER A N 4, S 17 (1826), ebenda S 227 Briefe von SOUTH und HIRSCHL, HALE, Ap J 5 S 119 (1897), WOLF, Nature 55, S 582 (1897), PICKERING, Pop Astr 38, S 134 (1930) SONNEFELD, Centr Z f Opt u Mech 52, S 110 (1931), ROY, C R 192, S 461 (1931)

⁸ B A 7 S 201 (1932), JONES, Proc R Soc London 88, S 491 (1913)

Spiegelscheiben als vollkommen elastisch ohne Hysteresis ansehen kann, und daß bis etwa 3 m Durchmesser die Komponente der Schwere senkrecht zur optischen Achse keine bedeutende Rolle spielt. Er nimmt an, daß die biegenden Kräfte achsensymmetrisch sind, und behandelt so eine kreisförmige, horizontale, am Rande unterstützte Planplatte vom Durchmesser $2R$ und der Dicke d aus einem Stoff von der Dichte δ und dem Elastizitätsmodul E unter der Voraussetzung, daß $d^2 R^2$ klein gegen 1 ist. Er erhält die Gleichung der Durchbiegungskurve eines Meridianschnittes, wo y die senkrechte Abweichung ist und $x R = \xi$ gesetzt wird, durch Summation der Gleichungen für die beiden Fälle, daß einmal eine ideale Ringstutze von dem Radius $r_0 = \varrho R$ mit dem Gewicht der Scheibe gegen diese drückt, und daß das andere Mal die Scheibe sich durch ihr eigenes Gewicht verbiegt

$$y = Kg \frac{\delta}{E} \frac{R^4}{d^3} \varphi(\sigma, \varrho, \xi), \quad (81)$$

wo K ein Faktor, g die Erdbeschleunigung, σ der Poissonsche Koeffizient und die Funktion φ durch die Elastizitätstheorie gegeben ist. Er gibt für $\sigma = 0,25$ eine Tabelle für φ als Funktion von ξ und ϱ , für die weitere Betrachtung bringt er diese Gleichung in die Form $f(\xi) = \alpha + \beta \xi^2 + \gamma \xi^4$, wo das zweite Glied einer Änderung der Brennweite, das dritte einer Änderung der sphärischen Abweichung des Spiegels entspricht. Die folgende Tabelle gibt die Werte der Konstanten für verschiedene Werte von ϱ der Ringstutze

ϱ	0	0,15	0,333	0,5	0,667	0,85	1
α	-1,549	-1,406	-1,020	-0,553	-0,033	+0,563	+1,350
β	+2,700	+2,348	+1,540	-0,685	-0,108	-0,805	-1,301
γ	-1,151	-0,942	-0,540	-0,132	+0,141	+0,242	+0,251

Für einen Planspiegel von 746 mm Durchmesser und 34,4 mm Dicke, dessen Ringstutze aus 100 gleichmäßig verteilten 30 mm langen Spiralfedern bestand, wurden durch Messung des Astigmatismus bei schrägem Lichteinfall die Koeffizienten β und γ für verschiedene ϱ bestimmt, sie stimmten befriedigend mit den durch Rechnung gefundenen Werten überein. Der Wert δE ist bei Kronglas und geschmolzenem Quarz etwa 0,34, bei Stahl 0,364 und bei Spiegelmetall 1,1. Das Glied $R^4 d^3$ zeigt, daß es für die Durchbiegung nicht auf das Verhältnis R/d ankommt, der Umstand, daß man bei großen Spiegeln ein zu hohes Gewicht vermeiden will, bedingt, daß der Wert bei dem großen Spiegel auf Mt. Wilson von 2560 mm Durchmesser und 306 mm Dicke auf 284 steigt, während er für einen Parabolspiegel von 186 mm Durchmesser und 32 mm Dicke nur 0,73 beträgt. Bei dem Metallspiegel von Lord Rosse von 1830 Durchmesser und 137 Dicke wird die Vergleichszahl unter Berücksichtigung des größeren δE etwa 1200. COUDER fand weiter durch Versuche, daß bei Unterstützung des Spiegels an drei Punkten des Randes der Grenzwert $R^4 d^3$, in cm gemessen, 1000 ist, wenn keine sphärische Überkorrektur bemerkbar sein soll. Bei dieser Art der Lagerung ist eine Abweichung der Wellenfläche von der Kugelform von $0,032 \mu$ noch zulässig. Die Schichtlinien der Wellenfläche sind Sechsecke mit nach innen durchgebogenen Seiten, die drei Seiten in der Nähe der Auflagen sind mehrmals kürzer als die andern. Das Beugungsscheibchen des Sternbilds ist ein abgerundetes Dreieck mit den Spitzen nach den Lagerstellen zu, die Ringe sind hier unterbrochen. Für eine Randstutze mit sechs Punkten gilt $R^4 d^3 < 9000$, bei Hinzufügung einer Mittelstutze < 12000 , bei neun Randstutzpunkten und drei auf einem Ring von einem Drittel Durchmesser < 45000 . Dabei ist angenommen, daß die über drei hinausgehenden Stützen eines Rings regelbare Gewichte sind. Um den

Einfluß der Auflage zu verringern, empfiehlt COUDER¹, den Spiegel am Rande zu verstärken, so daß er eine einem Tamburin ähnliche Form erhält

Die älteren Arten der Lagerung des Spiegels von J F W HERSCHEL auf mehreren Wollschichten oder die von FOUCAULT auf einem Luftkissen haben den Nachteil, daß die Luft die Rückseite des Spiegels nicht frei umspülen kann und so der allseitig gleichmäßige Wärmeaustausch des Spiegels mit der Umgebung gehindert ist, außerdem ist beim Luftkissen die Erhaltung der Visierlinie nicht genügend gesichert. Man lagert daher die großen Spiegel auf einer großen Anzahl regelmäßig verteilter kleinerer Flächen. Die eine Art wurde schon bei den älteren Spiegelfernrohren von ROSSE und LASSELL² angewandt, da beim Metallspiegel die Biegung eine noch größere Rolle spielt, sie findet sich heute bei den Spiegeln von Zeiss und dem in Victoria, Abb 84 gibt die Lagerung von Zeiss wieder.

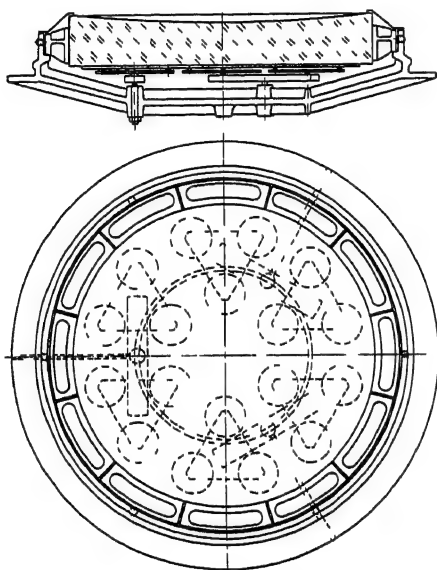


Abb 84 Die Lagerung eines Fernrohrhohlspiegels nach Zeiss (MEYER)

Man geht hier von drei Stützpunkten aus, die gleichmäßig im Schwerpunktskreis verteilt sind. Auf jedem der drei Stützpunkte ruht ein in der Mitte auf einer Kugel kippbarer doppelarmiger Hebel, an jedem Ende trägt jeder dieser Hebel eine dreieckige Tragplatte, die wieder in der Mitte auf einer Kugel kippbar ruht, ebenso trägt jede Ecke des Dreiecks je auf einer Kugel kippbar eine runde Platte, so daß der Spiegel von 18 runden Platten getragen wird. Da alle Hebelarme unter sich und die Radien der dreieckigen Tragplatten unter sich gleich sind, müssen auch die Auflagedrucke aller 18 Platten gleich sein. Die andere Art der Lagerung wurde von RICHIEY³ bei den großen Spiegeln auf Mt Wilson angewandt. Hier wird der Spiegel von Hebeln getragen, deren Druck durch Gewichte geregelt werden kann, auf Verbesserungen dieser Art von PEASE und COUDER⁴ sei nur verwiesen. Gegen Querverschiebungen wird der Spiegel am

besten in der Mittelschicht abgestützt und die ungleiche Ausdehnung von Spiegel und Fassung berücksichtigt, etwa nach der STEINHILF'schen Art (Ziff 43). Die Empfindlichkeit gegen schlechte Lagerung zeigt ZSCHIMMER⁵

Wenn der Spiegel und ebenso das Rohr sich vollkommen gleichmäßig durch die Wärme ausdehnen, so ist die Änderung ΔA des Auszugs für scharfes Bild $\Delta A \, dT = F(\alpha_1 - \alpha_2)$, wo T die Temperatur, α_1 und α_2 die Ausdehnungskoeffizienten für Spiegel und Rohr sind. Wenn aber die Temperatur von der Vorderseite zur Rückseite sich gleichmäßig ändert und der Temperaturunterschied der beiden Seiten $T_1 - T_2$ ist, so ist die Brennweitenänderung $\Delta f = 2\alpha(T_1 - T_2)F^2 \, d$, wo d die Dicke des Spiegels ist. Dieser Temperaturunter-

¹ C R 186, S 311 (1928)

² ROSSE (OXMANSTOWN), Phil Trans 1840, S 503, LASSELL, Report 20th Meeting BAS 1850, S 150, COMMON, Obs 3, S 167 (1880)

³ Ap J 5, S 143 (1897)

⁴ B A 7, S 246 (1932), PEASE, Publ A S P 44, S 308 (1932)

⁵ Z f Instrk 33, S 376 (1913)

schied ist nur zu einem ganz unerheblichen Teil auf die Ausstrahlung der Vorderseite gegen den Himmel zurückzuführen, im wesentlichen vielmehr darauf, daß bei der Abkühlung im Laufe der Nacht die Luftströme auf der Vorderseite sich freier entfalten können und daher diese Seite kälter als die Rückseite wird. Durch Versuche fand COUDER¹, daß die Zeit t , in der bei Erwärmung einer Seite die Brennweitenänderung den halben Wert der maximalen erreicht, von der Dicke des Spiegels nach der Formel $\log_{10} t = 0,656 + 1,908 \log_{10} d$ abhängt. Für den Wärmeausgleich innerhalb des Spiegels ist der Wert von $\eta = \alpha \delta c k$ maßgebend, wo α der Ausdehnungskoeffizient, δ die Dichte, c die spezifische Wärme und k die Wärmeleitfähigkeit ist. Dieser Größe ist auch die Formänderung nach einer bestimmten Zeit proportional. Der Wert von $\eta \cdot 10^5$ ist für Spiegelglas 197, für Pyrexglas 25, für geschmolzenen Quarz 0,93, für Spiegelmetall 6,3 und für Stahl 4,7. Über Versuche mit einem Pyrexspiegel von 19 cm Durchmesser und mit verstärktem Rand berichtet COUDER² (s. auch PERTIT S 181). Die beiden Fangspiegel des neuen Greenwicher Reflektors sind aus geschmolzenem undurchsichtigem Quarz, dem dünnere Platten aus durchsichtigem aufgeschmolzen sind. Solche Quarzplatten liefern unter dem Namen Vitrosil die deutschen Ton- und Steinzeugwerke, Berlin-Charlottenburg, Thermal Syndicate United, Wallsend/Tyne und Quartz Silice, Paris. Der Hauptspiegel des Reflektors der MILLS-Expedition (Ziff 60) verlangerte in der ersten Hälfte der Nacht seine Brennweite rasch bis zu 3 mm. Die Schnelligkeit der Temperaturänderung war von stärkerem Einfluß als die Größe. Bessere Ventilation durch Öffnungen im Spiegelgehäuse verringerten die Änderung auf etwa die Hälfte. Am besten bewahrte sich die umständliche Kühlung mit einer Kaltmaschine, die etwa 2½ Stunden vor Sonnenuntergang begann und nach einer Temperatureinmiedrigung in der Nähe des Spiegels von 5 bis 6°C aufhorte, bei richtiger Abstimmung erzielte man für 1 oder 2 Stunden geringe Brennweitenänderungen. Die Versilberung der Rückseite war ohne merklichen Einfluß, was für den erwähnten geringen Einfluß der Ausstrahlung spricht³. RITCHEY⁴ beobachtete beim 1,5 m-Spiegel von Mt Wilson Verlängerung der Brennweite bis zu 1 mm, bei Anwendung einer isolierenden Kammer war die Änderung oft nur 0,127, gelegentlich 0,329. Nach PERRINE⁵ zeigt ein mit Band am Rande frei aufgehängter Spiegel keine Änderung der Brennweite. Außerdem beobachtet man aber noch eine besondere Randwirkung, indem die äußere Zone sphärische Abweichung zeigt. Bei dem MILLS-Reflektor zeigte sich in der ersten Hälfte der Nacht bei fallender Temperatur Unterkorrektur. Ebenso beobachtete man beim Victoria-Spiegel⁶, der nach dieser Richtung besonders genau untersucht wurde, Unterkorrektur des Randes, und zwar an einem ungünstigen Tage zuerst 55 Minuten nach Öffnung der Kuppel 3,57 mm, dann nach 3¼ Stunden 2,55, bei schwächerer Temperaturänderung während des Tages war ½ Stunde nach Öffnung nur die äußerste 2 Zoll breite Zone unterkorrigiert. Die darauffolgende Änderung war gering, durch die Einhüllung des Spiegels wurden die Änderungen geringer. RITCHEY beobachtete Überkorrekturen, über seinen Wärmeschutz bei den großen Spiegeln s. Ziff 60. Auch beim Refraktor beobachteten SCHLESINGER⁷ und SCHORR eine Änderung der sphärischen Korrektur, bei fallender Temperatur im Laufe der Nacht tritt Unterkorrektur ein. Zur Vermeidung von Refraktionsstörungen im Rohre

¹ B A 7 S 283 (1932) ² C R 186, S 311 (1928)

³ WRIGHT, Publ Lick Obs 9, S 25 (1911)

⁴ Ap J 29, S 198 (1909) 32, S 26 (1910)

⁵ Publ A S P 30, S 55 (1918)

⁶ PLASKETT, Publ Astrophys Obs Victoria 1, Nr 1 (1920)

⁷ B S A F 29, S 211 (1915), Wash Nat Ac Proc 1, S 13 (1917), SCHORR, VJS 68, S 189 (1933)

hat man sich heute bei den größeren Spiegelfernrohren für offenes Gitterrohr entschieden, COUDER verkleidet das Stahlgerüst mit dünnen Holzwan- den

55 Doppelspiegel mit größerem Gesichtsfeld Um das brauchbare Gesichtsfeld zu vergrößern, hat SCHWARZSCHILD¹ vorgeschlagen, eine Gruppe von zwei Hohlspiegeln zu verwenden (Abb 85a), von denen der zweite etwa halb so große Spiegel die Strahlen vom ersten vor ihrer Vereinigung im Bilde auffängt, die Platte liegt zwischen den Spiegeln. Die Anordnung ist also im Aufbau einem photographischen Doppelobjektiv ähnlich. Die Daten eines solchen Doppelspiegels für die Gesamtbrennweite 1 sind $r_1 = -5$, $r_2 = -1,67$ und Abstand $d_1 = 1,25$. Die Form des großen Spiegels nähert sich dem Hyperboloid, die des kleinen einem Ellipsoid und ist diesen Flächen bis zu einem Öffnungsverhältnis 1:3 praktisch gleich. Die Herstellung wird dadurch erschwert, daß beide Spiegel eine von der Kugel so erheblich abweichende Form erhalten müssen. Bei dieser Bauart ist außer der sphärischen Abweichung die Koma gehoben und Bildfeldebnung im übertragenen Sinne erreicht. Der Astigmatismus ist $2\frac{1}{2}$ mal so klein wie beim einfachen Parabelspiegel. Die trigonometrische Durchrechnung

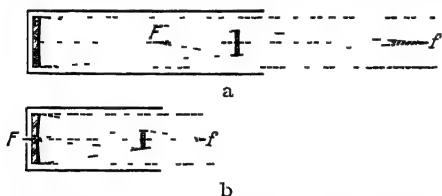


Abb 85 Photographische Doppelspiegel nach a) SCHWARZSCHILD, b) CHRÉTIEN

für $1,5^\circ$ Hauptstrahlneigung (3° Gesichtsfeld) ergab eine radiale Streuung von $18''$, das brauchbare Gesichtsfeld ist also nahe gleich dem der Normalrefraktoren. CHRÉTIEN² hat die CASSEGRAINSche Bauart in ähnlicher Weise verbessert (Abb 85b). Es mögen zunächst die Daten für einen ausgeführten Doppelspiegel von 505 mm Öffnung und 3450 mm Brennweite folgen, und zwar ebenfalls bezogen

auf die Brennweite 1, sie sind $r_1 = -0,952$, $r_2 = 0,645$ und $d_1 = 0,307$. Das letzte Bild liegt dicht hinter dem Hauptspiegel. Der Astigmatismus ist gehoben, die Bildkrümmung ist 6,75 mal stärker als der Kehrwert der Brennweite. Es wurden daher entsprechend gekrümmte Platten vorgeschlagen. Während sich SCHWARZSCHILDS Bauart mehr für das große Öffnungsverhältnis 1:3 bis 1:4 eignet, wird die CHRÉTIENS für 1:6 bis 1:8 empfohlen, zumal die Länge im Verhältnis zur Gesamtbrennweite nur etwa ein Drittel davon beträgt. Ein Vorteil davon ist auch die bequemere Zugänglichkeit der Platte und die geringere Verdeckung durch den Fangspiegel, die das Beugungsbild eines Sternes weniger beeinträchtigt. Den Wert dieser Doppelspiegel erkennt man, wenn man berücksichtigt, daß nach RITCHEY³ beim 1,5 m-Spiegel auf Mt Wilson im allgemeinen nur ein Gesichtsfeld von $38'$ (84 mm) ausnützbar ist, für feinere Messungen sogar nur $15'$ (33 mm). Ein Doppelspiegel nach CHRÉTIEN von 1 m Durchmesser 1:6,8 ist von RITCHEY für das Naval Observatory in Washington hergestellt worden, ein solcher nach SCHWARZSCHILD für das Kukwood-Observatorium der Universität Indiana im Bau.

SAMPSON sucht nach dem Vorgang von ZENGER⁴ eine ähnliche Verbesserung des Bildes durch ein mehrteiliges Linsensystem zwischen Objektiv und Brenn-

¹ Gott Abh NF 4, Nr 2 (1905), BISKE, Z f Math u Phys 52, S 191 (1905), BOULOUCH, C R 175, S 1047 (1922), COUDER, ebenda 183, S 1276 (1926).

² Rev d'Opt 1, S 13 (1922), C R 185, S 1125 (1927), RITCHEY u CHRÉTIEN, B S A I 41, S 541 (1927), RITCHEY, ebenda 41, S 529 (1927), 42, S 27 (1928), C R 185, S 266 u 1024 (1927), 191, S 22 (1930), Trans Opt Soc 29, S 197 (1927/8), J Can R A S 22, S 159 (1928). L'évolution de l'astrophotographie. St Gobain 1930.

³ B S A F 42, S 31 (1928).

⁴ Sitzber d böhm Ges d Wiss Febr 1875, Jan 1877 SAMPSON, M N 73, S 524, Obs 36, S 248 (1913), Phil Trans 213, S 27 (1914), VIOLETTE, Rev d'Opt 1, S 397 (1922).

punkt zu erreichen, diese Einrichtung hat den Nachteil, daß mehr storendes Reflexlicht vorhanden ist. ROSS¹ verbesserte den 1,5 m Spiegel von Mt Wilson durch eine afokale zweiteilige Zusatzlinse von 8" Öffnung 15" vor dem Brennpunkt. Eine zerstreue achromatische Zusatzlinse kann wie beim Teleobjektiv dazu dienen, das Bild zu vergrößern.²

SHAPIRY³ steigerte das Öffnungsverhältnis des 2,5 m-Spiegels auf Mt Wilson auf nahe das Doppelte, indem er dicht vor dem Brennpunkt ein photographisches Objektiv von $F = 75$ mm und $D/F = 1,9$ anordnete, er erzielte so bei Sternphotographie den Gewinn einer Größenklasse, das Gesichtsfeld betrug nur 6'. Ein ähnliches Zusatzsystem ist auch beim Refraktor von 60 cm Öffnung der Hamburger Sternwarte im Gebrauch.⁴ ZARUBA⁵ empfiehlt aplana-tische Linsen als Zusatzlinsen. SCHMIDT⁶ geht davon aus, daß ein Kugelspiegel mit Blende im Krümmungsmittelpunkt ein von Koma und Astigmatismus freies Bild auf einer Kugelfläche gibt, deren Radius gleich der Brennweite ist, die sphärische Abweichung soll durch eine durchbohrte deformierte Planplatte in der Brennebene gehoben werden. Ein solcher Spiegel von 44 cm Durchmesser und dem großen Öffnungsverhältnis 1,4 wurde von ihm für die Hamburger Sternwarte mit gutem Erfolg ausgeführt, die Korrekptionsplatte hatte einen Durchmesser von 36 cm, die Aufnahmen werden auf einen gekrümmten Film gemacht, das komafreie Feld betrug 15°.

56. Die Spiegelfernrohre Die Spiegelfernrohre für Beobachtung unterscheiden sich durch die Anordnung und Ausbildung des Okularteiles. Die einfachste Bauart geht auf ZUCCH⁷, den Erfinder des Spiegelfernrohrs (1616), allerdings mit Zerstreuungslinse als Okular, und auf LEMAIRE⁸ zurück, sie ist aber nach HERSCHEL⁹ benannt (Abb 86), bei ihr ist das Okular am Rande des Rohres, schrag auf die Mitte des Spiegels gerichtet, angeordnet (Front View, Skew Telescope), das Bild zeigt alle Unvollkommenheiten, die in größerem Abstände von der Achse auftreten, außer wenn ein Parabolspiegel mit entsprechend exzentrischer Achse benutzt wird, der aber nicht in Betracht kommt. HERSCHEL selbst hat hauptsächlich Spiegel der von NEWTON angegebenen Bauart hergestellt, von 1774 bis 1795 allein 200 Stück von 7' Brennweite, 150 von 10' und 80 von 20', außer den kleineren GREGORYS bis zu 10' Brennweite. Der große Front View hatte 122 cm Durchmesser und 10 m Brennweite, das Gewicht betrug 960 kg, am Tage der Aufstellung (1789) entdeckte HERSCHEL damit den sechsten Saturnmond. Nach ihm hat wohl nur noch RAMAGE¹⁰ Front Views gebaut. Über die Prüfung eines Fernrohrs von HERSCHEL berichteten neuerdings DAVIES, STEAVENSON und AINSLIE¹¹.

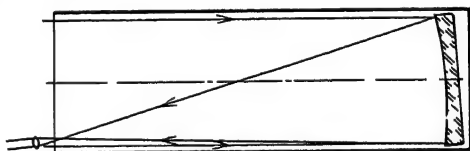


Abb 86 Das Spiegelfernrohr nach HERSCHEL

¹ Ap J 77, S 243 (1933)

² MILLOCHAU C R 143, S 33 (1904)

³ Mt Wilson Comm 68 (1920), Wash Nat Ac Proc Mai 1920

⁴ SCHORR, V J S 68, 190 (1933)

⁵ B S A F 43, S 81 (1929)

⁶ Centr Z f Opt u Mech 52, S 25 (1932), Mitt Hamburg-Bergedorf 7, S 15, (Nr 36) (1932)

⁷ Optica philosophica Lugdunum Batavorum 1, S 126 (1652)

⁸ Machines et inventions approuvées par l'academie des sciences Bd 6 (1735)

⁹ Phil Trans 76, S 499 (1786), 1795, S 347

¹⁰ Mem R A S 2, S 413 (1826)

¹¹ DAVIES, M N 84, S 23 (1924), STEAVENSON, Obs 47, S 262 (1924), 50, S 114 (1927), 53, S 311 (1930) Trans Opt Soc 26, S 210 (1924/5), AINSLIE, J B A A 42, S 65 (1932)

NEWTON¹ schaltete vor der Vereinigung der Strahlen zum Bild einen um 90° ablenkenden Spiegel (Fangspiegel) (Abb 87) so ein, daß das Bild am Rande des Rohres entsteht und durch ein Okular beobachtet werden kann, wobei die Kopfhaltung meist bequemer als bei einem geradsichtigen Fernrohr ist, noch

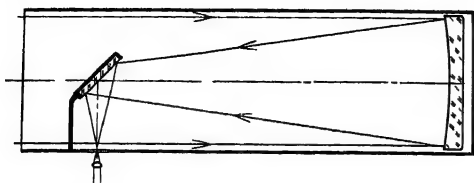


Abb 87 Das Spiegelfernrohr nach NEWTON

besser ist es, wenn das Okular um die Hauptrohrachse drehbar ist² Man kann auch bei azimuthaler Aufstellung die Strahlen vom Fangspiegel in die Kippachse reflektieren³ COUDER⁴ neigt den Fangspiegel so, daß der Einfallswinkel α nur 25° ist, der Astigmatismus infolge Durchbiegung ist so 3,6mal geringer wie für $\alpha = 45^\circ$, ferner kann so der Spiegel eine kreisrunde Form erhalten, ohne zuviel Licht wegzunehmen, und der Einblick liegt dem Hauptspiegel näher Soll keine Abschattung nach dem Rande des Gesichtsfeldes eintreten und ist D der Durchmesser des Hauptspiegels und G der der Gesichtsfeldblende des schwachsten Okulars, so gilt für den kleineren Durchmesser des Fangspiegels

$$d = \frac{D^2}{2F} + G \frac{2F - D}{2F} \quad (82)$$

Ist das Gesichtsfeld klein oder laßt man eine Abschattung nach dem Rande des Gesichtsfeldes zu, so halt der Fangspiegel von dem auf den Hauptspiegel fallenden Licht um so weniger zurück, je kleiner das Öffnungsverhältnis ist⁵ NEWTON gilt als der erste, der ein brauchbares Spiegelfernrohr zustande brachte (s jedoch S 175), er legte ein solches von $D = 1\frac{1}{8}''$, $F = 6\frac{1}{4}''$ und 38facher Vergrößerung 1671 der Royal Society vor, HADLEY 1722 ein solches von 6'' Öffnung, 1 10 mit 200facher Vergrößerung, das nahe das gleiche leistete wie das Luftfernrohr von HUYGENS von der gleichen Öffnung und 123' Bienenweite Erst damit war für die Einführung des Spiegelfernrohrs die Bahn freigelegt Man kann den Fangspiegel verkleinern, wenn man das Bild nahe dem Fangspiegel entstehen laßt und mit einem terrestrischen Okular beobachtet^{1a 6} Wollte man den Fangspiegel senkrecht zur Achse des Hauptspiegels stellen und ein Bild in der durchbrochenen Mitte des Hauptspiegels entwerfen, so mußte der Fangspiegel den halben Durchmesser des Hauptspiegels erhalten und würde zuviel Licht zurückhalten Stellt man ihn aber in größerer Nahe der Bienenweite des Hauptspiegels auf, so kann er kleineren Durchmesser erhalten Damit aber das Bild in der durchbrochenen Mitte des Hauptspiegels entsteht und so zugänglich wird, muß der Fangspiegel eine entsprechende Scheitelkrümmung erhalten Man wird so auf die Bauarten von CASSEGRAIN⁷ (Abb 88) und GREGORY⁸ (Abb 89) geführt Bei der ersten ist ein erhabener Fangspiegel vor der Brennebene angeordnet, bei der zweiten ein hohler hinter der Brennebene Der Strahlengang im ersten Fall entspricht dem des astronomischen Fernrohrs mit Teleobjektiv, der zweite dem des ter-

¹ Phil Trans abr S 196, 1638–1700 (1672), Opticks, Prop 8 London 1704, Ostwalds Klass 96, S 71

² AIRY, M N 13, S 165 (1853)

³ COMMON, M N 53, S 19 (1893)

⁴ B A 7, S 276 (1932)

⁵ TENNANT M N 47, S 244 (1887), Roy, B S A F 42, S 497 (1928)

⁶ FOUCAULT, Ann Obs Paris 5 (1858), Recueil des travaux scientifiques, S 278 Paris Gauthier-Villars 1878

⁷ Phil Trans abr S 44, 1638–1700 (1672), J des Savans 1672, S 204, JOMKINS, J B A A 41, S 296 (1930), DALL, ebenda 41, S 224 u 296 (1931), ЗСНОКЛ, Centi Z f Opt u Mech 52, S 209 (1931)

⁸ Optica promota S 92 London Thomson 1663

restrischen Fernrohrs. Bei den Bauarten von NEWTON und CASSEGRAIN ist das Bild umgekehrt, bei der Bauart von GREGORY aufrecht. Hat der Fangspiegel m mal kleineren Durchmesser als der Hauptspiegel, ist seine Größe dem achsenparallel einfallenden Bündel angepaßt und wird das Bild im Ausbruch des Hauptspiegels von der Brennweite F entworfen, so ist die Dingweite für den Fangspiegel $F \cdot m$, die Bildweite für diesen ist bei GREGORYS Bauart $F \left(1 + \frac{1}{m}\right)$, bei der CASSEGRAINS $F \left(1 - \frac{1}{m}\right)$.

Da nun die Gesamtbrennweite zu F in demselben Verhältnis steht, wie die Bildweite des Fangspiegels zu seiner Dingweite, so ist sie bei der Bauart GREGORYS $(m + 1)$ mal, bei der CASSEGRAINS $(m - 1)$ mal so groß wie die des Hauptspiegels. Bei gleicher Vergrößerung des Bildes durch den Fangspiegel wird dessen Durchmesser bei der Bauart von CASSEGRAIN kleiner, ebenso auch das Fernrohr

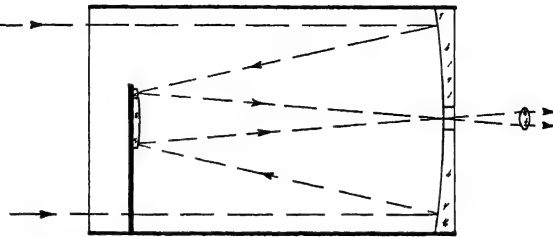


Abb 88 Das Spiegelfernrohr nach CASSEGRAIN

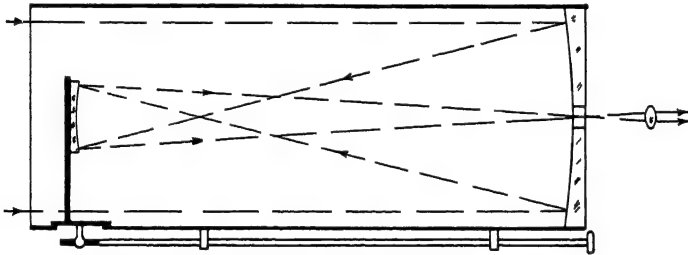


Abb 89 Das Spiegelfernrohr nach GREGORY

kurzer. Das Fernrohr von GREGORY wurde früher in kleineren Größen viel von Liebhaberastronomen benutzt. Zur Einstellung des scharfen Bildes dient meist die Verstellung des Fangspiegels. Für größere Fernrohre wählt man die Bauart von CASSEGRAIN. Will man den Ausbruch des Hauptspiegels vermeiden, sei es daß man ihn als Hindernis einer genauen Flachengebung ansieht oder daß man wegen Spannung ein Zerspringen beim Ausbohren befürchtet, so kann man mit NASMYTH¹ durch einen ebenen Fangspiegel dicht vor dem Hauptspiegel ähnlich wie bei NEWTON das Bild am Rande des Rohres entwerfen (Abb 90). Es muß noch auf

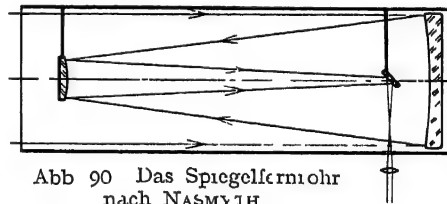


Abb 90 Das Spiegelfernrohr nach NASMYTH

einen Nachteil der Bauarten von CASSEGRAIN und GREGORY aufmerksam gemacht werden. Um nämlich die Strahlen abzufangen, die, ohne von den beiden Spiegeln zurückgeworfen zu sein, unmittelbar in das Okular gelangen und das Bild verschleiern, muß man bei diesen Bauarten am Ort des Bildes des Fangspiegels hinter dem Okular, d. h. in der Nähe der Austrittspupille, eine Blende anbringen, deren Öffnung die gleiche Größe wie das Bild des Fangspiegels hat und so alle Strahlen, die am Fangspiegel vorbei unmittelbar das Okular treffen, abschneidet.

¹ Dinglers J 119, S 27 (1851), BABINET, C R 48, S 861 (1859)

Durch diese Blende wird aber die Übersicht des Gesichtsfeldes erschwert, da nur noch eine Art Schlüsselochbeobachtung möglich ist. Über das Ausrichten von Haupt- und Fangspiegel sei auf die Quellen verwiesen¹. In demselben Verhältnis, wie die Brennweite des Doppelspiegels groß ist als die des Hauptspiegels, ist das Öffnungsverhältnis des Hauptspiegels größer als das des Doppelspiegels. Entsprechend ist aber auch die Abweichung des Paraboloids von der Kugel beim Doppelspiegel größer als bei einem einfachen Spiegel gleicher Brennweite, die Schwierigkeit der Herstellung und auch der Zentrierung der beiden Spiegel wächst. Während man für die Bauart nach NEWTON vielfach das Öffnungsverhältnis 1:10 wählt, ist es bei der nach CASSEGRAIN meist nur etwa halb so groß, die letzte Bauart hat trotzdem kürzere Fernrohrlänge. SCHIAER² ordnete bei Aufnahmen im Brennpunkt des Hauptspiegels einen unversilberten Fangspiegel vor dem Brennpunkt an, der nach Art des Uhrglases zwei parallele hyperbolische Flächen hatte und wie eine Planplatte wirkte. Dieses lichtschwächere, durch ein Okular vervollständigte CASSEGRAINSche Fernrohr diente ihm als Leitfernrohr. Als Abart der Bauart von CASSEGRAIN kann man das von FORSTIER und FRIRSCH³ ausgebildete, aber schon 1825 angegebene⁴ sog. Brachyteleskop

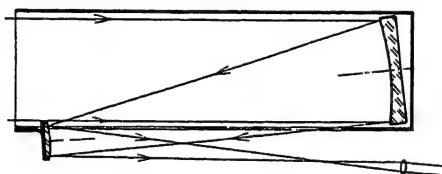


Abb 91 Der Brachyt

sehen (Abb 91), das den Ausbruch des Hauptspiegels dadurch vermeidet, daß der erhabene Fangspiegel neben die auf den Hauptspiegel fallenden Strahlen verlegt ist. Der Achsenstrahl wird an beiden Spiegeln unter schiefem Einfall zurückgeworfen. Die Einfallswinkel werden so gewählt, daß der Astigmatismus für die Mitte des Bildfeldes gehoben ist, doch bleibt die Bildgüte geringer als beim CASSEGRAINSchen Fernrohr. Eine ähnliche Einrichtung, aber ohne Okular, findet man schon bei ZAHN⁵.

Die sphärische Abweichung wird bei den Bauarten nach CASSEGRAIN und GREGORY dadurch gehoben, daß die beiden Spiegel jeder für sich abweichungsfrei sind. Der Fangspiegel muß also hyperbolisch bzw. elliptisch sein, man kann so jeden Spiegel für sich prüfen und auswechseln, auch ist die Zentrierung der Spiegel zueinander weniger empfindlich. Haben beide Spiegel Kugelform, so kann die sphärische Abweichung nicht gehoben werden, da die des Hauptspiegels überwiegt⁶. Die Koma ist bei den Doppelspiegeln, wenn die Einzelspiegel frei von sphärischer Abweichung sind, von gleicher Größe wie bei dem Parabolspiegel gleicher Öffnung und gleicher Brennweite, dagegen ist Bildkrümmung und Astigmatismus bei den in Betracht kommenden Formen wesentlich stärker. Liegt beim CASSEGRAINSchen die Öffnungsblende im Hauptspiegel und ist der Fangspiegel hyperbolisch, so ist für $F = 1$, $r_1 = -1,2$, $r_2 = +1,75$, $d_1 = 1,5$, die Bildkrümmung $\rho_s = -15$, $\rho_t = -23$. Beim GREGORYschen sind für $r_1 = -1,2$, $r_2 = -1,75$, $d_1 = 1,3$ die Werte $\rho_s = 15$, $\rho_t = 7$.

GREGORYsche Spiegelfernrohre wurden im 18. Jahrhundert viel benutzt und verdrängten die Luftfernrohre SHORI, dessen Spiegel wegen ihrer Bildgüte

¹ KEELER, Ap J 11, S 336 (1900), SCHLESINGER, ebenda 32, S 376 (1910), COUDER, BA 7, S 278 (1932)

² TIERCY, Publ Obs Genève 3, S 253 (1932), VJS 68, S 178 (1933)

³ Dinglers J 226, S 278 (1877), Carls Rep 24, S 123 (1878), LIPPICH, Z f Math u Phys 24, S 123 (1879), KLEIN, Centr Z f Opt u Mech 2, S 121 (1881), 3, S 49 (1882), JURNER Obs 18, S 81 (1895)

⁴ COMMON, MN 55, S 86 u 325 (1895)

⁵ Oculus artificialis II, S 153. Heribopol 1685

⁶ BATTELLI, Exners Rep 21, S 524 (1885), v. HOFÉ, Centr Z f Opt u Mech 42, S 177 (1921)

besonders berühmt waren, hat von 1732 bis 1768 etwa 1400 Spiegelfernrohre gebaut. Der größte von ihm verfertigte Spiegel hatte 55 cm Durchmesser und 3 m Brennweite. Es sind Spiegel von ihm erhalten, deren Reflexionsvermögen bis heute noch wenig gelitten haben soll. Angaben über seine Spiegelfernrohre macht SMITH¹, es seien hier die Werte für ein kleineres angeführt: Brennweite des Hauptspiegels $f_1 = 244$ mm, Durchmesser $D_1 = 58$ mm, für den Fangspiegel gilt $f_2 = 38$ und $D_2 = 15$ mm, Abstand der Spiegel $A = 286$ mm, also Gesamtbrennweite $F = 2400$ mm, das HUYGENSSche Okular mit $f_3 = 42$ mm und 18° Gesichtsfeld gibt 57fache Vergrößerung. Ein Spiegelfernrohr im Museum zu Cherbourg soll nach der Gravierung 1666 von BLUNT für GREGORY gebaut sein². Bei dem Spiegelfernrohr von MARTIN³ fallen die Strahlen erst nach Ablenkung um 90° an einem großen Planspiegel auf den Objektivspiegel, das Bild wird durch einen Ausbruch im Planspiegel oder mit einem NEWTONschen Fangspiegel (Abb 96) beobachtet. Über die Verwendung siehe auch Ziff 59.

57 Die katadioptrischen Spiegelfernrohre Den bisher behandelten Spiegelfernrohren, den reinen (katoptrischen), bei denen nur im Okular oder in dessen Nahe Linsen vorkommen, stehen die gemischten (katadioptrischen) Spiegelfernrohre gegenüber. Gegen einen Lacküberzug⁴ als Schutz der Oberflächenversilberung bestehen Bedenken. Um die Versilberung durch einen Überzug, gewöhnlich von Kupfer, schützen zu können, wurde früher, wo man eine Neuversilberung mehr als jetzt scheute, vielfach als Spiegel eine auf der Rückfläche versilberte Linse vorgeschlagen. An die Güte des Glases werden hier höhere Ansprüche gestellt. Die Nachteile dieser Bauart, die bisher keine Verbreitung gefunden hat, sind die Nebenbilder, die durch ein- oder mehrmalige Zurückwerfung an der Grenze von Luft und Glas und darauffolgende ein- oder mehrmalige an der Silberschicht entstehen und die hier je etwa 4% des Lichtes enthalten, während beim Linsenfernrohr die durch zweifache Zurückwerfung an der Grenze von Glas und Luft entstandenen Nebenbilder nur 0,16% enthalten. Je weiter allerdings die Nebenbilder von der Brennebene abstehen, um so mehr ist ihr Licht in dieser ausgebreitet und die Helligkeit des Nebenlichtes vermindert. Man hat auch vorgeschlagen, bei einer einfachen Spiegellinse als Objektiv die Radien so zu wählen, daß die Nebenbilder mit dem Hauptbild zusammenfallen⁵, es läßt sich nach STRAUBEL⁶ dies auch dann für große Öffnung erreichen, wenn zur Hebung der sphärischen Abweichung die Flächen von der Kugelgestalt abweichen. Die Schwierigkeit, die beiden Flächen zentriert zu erhalten, da die übliche Art des Abschleifens des Randes hier versagt, und die Herstellung zweier von der Kugel abweichenden Flächen stehen der Anwendung im Wege, dazu kommt noch, daß das Hauptbild und die Nebenbilder nicht gleich groß sind. Wählt man die Radien der Spiegellinse recht verschieden, so muß die Farbenabweichung dieser Linse durch andere Linsen aufgehoben werden. Die einfachste Anordnung ist ein aus zwei benachbarten Linsen bestehendes Objektiv mit versilberter Rückfläche⁷.

¹ A Compleat System of Opticks. Cambridge. Crownfield 1738. Übersetzt von KASTNER, ALTENBURG, RICHTER 1755.

² B S A F 28, S 507 (1914).

³ System of Optics, S 265. London. Hodges 1740, GEISSLER, Geschichte d Spiegelteleskops, S 188. Dresden. Walther 1807, STEINHEIL, A N 48, S 148 (1858) SCHÄER, B S A F 41, S 36 (1927).

⁴ PEROT, C R 149 S 725 (1909) MIETHE, A N 208, S 85 (1919).

⁵ NEWTON, Opticks. London. Smith u Walford 1704. Ostwalds Klass 96 S 71.

⁶ ZEISS, Dtsch R Patent 400771 (1914).

⁷ BARFUSS, A N 15, S 286 (1838), 18, S 197 (1841), MANGIN, Mém de l'officier du génie 25, S 211 (1876), GOERZ, D R P 82671 (1895), MIETHE u a, D totalc Sonnenfinsternis vom 21. 8. 1914. Braunschweig. Vieweg 1916, SCHÄER, A N 171 S 315, B S A F 20, S 281 (1906).

Will man der Kosten wegen mit einer einzigen großen Hauptspiegellinse auskommen¹, so bietet die Zentrierung der kleinen Zusatzlinsen Schwierigkeit. Auch für die Bauarten nach GREGORY und CASSEGRAIN hat man die Ausbildung beider Spiegel als Spiegellinsen versucht².

58 Die Medialfernrohre Während bei diesen Bauarten das Spiegelfernrohr den Ausgangspunkt bildet, ist SCHUPMANN³ bei den Medialfernrohren von dem Linsenfernrohr ausgegangen. Wie oben (Ziff 24) gezeigt wurde, ist die Aufhebung des sekundären Spektrums bei einem Objektiv mit getrennten Linsen aus gewöhnlichen Glasarten wohl möglich, aber das Bild ist virtuell. Indem man die Hinterfläche der letzten Linse als Hohlspiegel ausbildet, kann man nun das virtuelle Bild in ein reelles, ebenso farbenreines verwandeln. Die Farben-

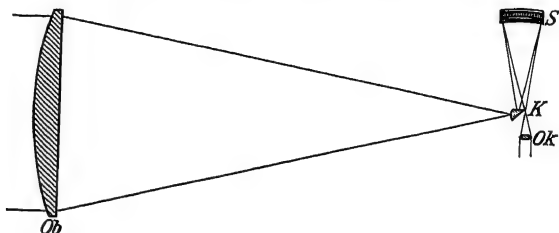


Abb 92 Das Medial

abweichung der einfachen Vorderlinse wird durch eine zerstreuende Hinterlinse aufgehoben, die beim Brachymedial zwischen Vorderlinse und Brennpunkt eingeschaltet ist, beim Medial hinter dem Brennpunkt. Bei diesem (Abb 92) ist im Brennpunkt der ersten Linse *Ob* noch eine Feldlinse angeordnet, die die Vorderlinse am Ort der hinteren abbildet und so die Aufhebung der Farbenabweichung der Vergrößerung bewirkt. Beide Fernrohre haben seitlichen Einblick. Beim Brachymedial⁴ (Abb 93) wird durch einen unter 45° geneigten Spiegel *sp* in der Nähe der ersten Linse ein Bild vor dem seitlichen Okular *Ok* entworfen. Beim Medial wird von der schief gestellten Spiegellinse *S* das Bild neben der Brennebene der vorderen Linse entworfen. Die Knickung des Strahlengangs erfolgt beim Durch-

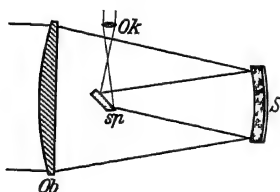


Abb 93 Das Brachymedial

gang der Strahlen durch die Brennebene der Vorderlinse, um so das ablenkende Prisma *K* mit der Feldlinse aus einem Stück bilden zu können. Die Vorderlinse muß eine von der Kugelform abweichende Fläche haben, beim Brachymedial auch noch die Hinterlinse, wenn die Koma gehoben werden soll. Gegenüber den Spiegelfernrohren haben die Medialfernrohre den Vorteil, daß der Durchmesser der Spiegellinse nur ein Bruchteil der Öffnung des Fernrohrs ist und sich daher Ver-

biegungsfehler des Spiegels infolge von Schwere und ungleicher Erwärmung weniger geltend machen. Beim Brachymedial kann die Spiegellinse nur 2–3 mal so klein sein, da sonst die Farbenabweichung der Vergrößerung zu stark wird, die hier durch besondere (Kompensations-) Okulare oder eine zusätzliche Ver-

¹ SMITH, Phil Trans 1740, S 113, WHITTLE, Engl Mech 81, S 288 (1905)

² AIRY, Cambridge Trans 2, S 105 (1827) (25 11 1822), v D GROEBEN, Centr Z f Opt u Mech 6, S 147 (1885)

³ Die Medialfernrohre Leipzig Teubner 1899, Z f Instrk 33, S 308 (1913), 41, S 212 u 253 (1921)

⁴ HAMILTON, Engl Patent 3781 (1814)

besserungslinse gehoben werden muß, die auch zur Verringerung der Bildfehler außer der Achse ausgenutzt und dem als Prisma ausgebildeten Fangspiegel aufgekittet werden kann. Bei dem Medial kann die Spiegellinse etwa 5 mal kleiner gewählt werden, allerdings wird sie aus zwei Linsen zusammengesetzt. Die Schiefstellung dieser Linse ist hier ein Nachteil, wenn sich auch für die Mitte des Sehfeldes befriedigende Korrektur erreichen läßt, so kann doch ein größeres Gesichtsfeld nicht ausgenutzt werden, auch für mikrometrische Messungen ist es nicht recht geeignet. Es ist so nur einige Male mit Objektivdurchmessern bis zu 38,5 cm zur Ausführung gekommen¹.

59 Die Verbindung des Fernrohrs mit Planspiegeln zur Vereinfachung der Montierung

Linse- und Spiegelfernrohr sind in verschiedener Weise mit ebenen Spiegeln verbunden worden. Die Verkürzung der Rohrlänge² ähnlich wie durch die PORRO-Prismen im Feldstecher hat keine Bedeutung gewonnen. Dagegen werden immer neue Vorschläge gemacht, um die Beobachtung bequemer zu machen, sie im geschlossenen Raum zu ermöglichen und so auch den Anschluß eines größeren Spektrographen zu erleichtern. Die einfachste optische Lösung bietet das gebrochene Fernrohr von HARTNESS³, bei dem die Okularachse in die Deklinationachse fällt (Abb 94). Bei dem auf STEINHEIL zurückgehenden gebrochenen Aquatoréal von LOEWY⁴ (Abb 95) werden die Strahlen durch einen zweiten Spiegel aus der Deklinationachse in die Polarachse gelenkt. Dieses Fernrohr wurde zweimal für Paris ausgeführt, das letzte hatte 60 cm Objektivdurchmesser und 18 m Brennweite⁵. Bei dem hier anwendbaren kleinen Öff-

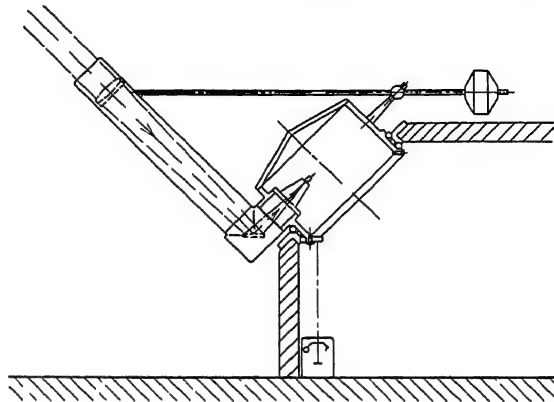


Abb 94 Das Fernrohr nach HARTNESS

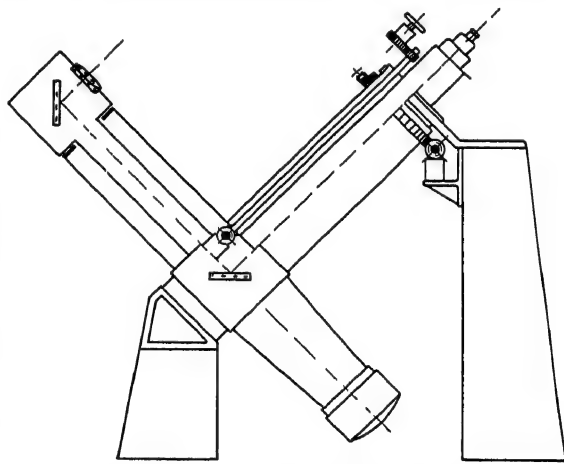


Abb 95 Das gebrochene Aquatoréal

¹ GRAFF, A N 158, S 279 (1902), SCHUPMANN, ebenda 196, S 101 (1913), MÜNDLER, ebenda 218, S 235 (1923)

² SCHALLER, B S A F 17, S 454 (1903)

³ J Amer Soc Mech Eng 1911, S 1511, Obs 35, S 83 (1912), Scient Amer 106, S 218 (1912), Amer Pat 1 045 142, MITCHELL, Pop Ast 20, S 337 (1912), ZARUBA, B S A F 43, S 81 (1929)

⁴ STEINHEIL, Munch gel Anz 14 (1842), LOEWY, C R 73, S 851 (1871), J de Phys (2) 2, S 349, C R 96, S 735 (1883), Z I Instrk 4, S 132 (1884), KNORR, J I Instrk 11, S 17 (1891)

⁵ LOEWY, C R 118, S 1295 (1894), PUISEUX, Ann Obs Paris 21, auch sep Paris Gauthier-Villars

nungsverhältnis ist der Zerstreuungskreis des sekundären Spektrums verringert. Kleinere Fernrohre dieser Art von 300 bis 400 mm Öffnung befinden sich in Nizza, Lyon, Besançon, Algier und Wien. Über die Theorie siehe LOEWY und PUISEUX¹. Die Anordnung der beiden Spiegel an anderer Stelle des Strahlengangs

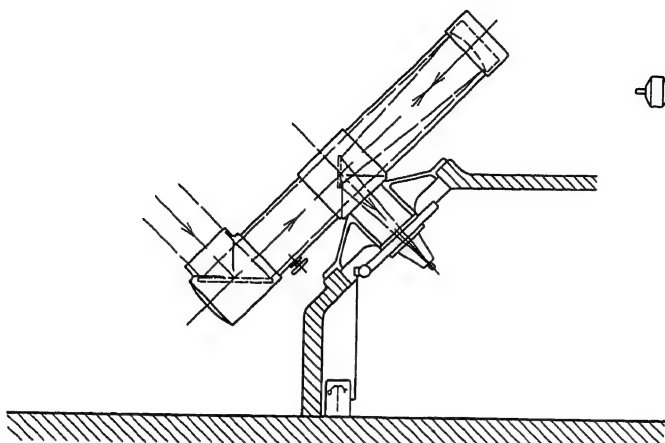


Abb 96 Das Spiegelfernrohr nach BRASHEAR und BROOKS

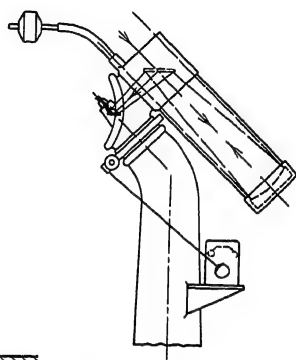


Abb 97 Das Spiegelfernrohr nach PORTIER

empfehlen HERMITE, HAMY und LINDEMANN². Mit der entsprechenden Ausbildung eines Spiegelfernrohrs beschäftigt sich LOEWY³, er ordnet entweder beide Planspiegel vor dem Parabolspiegel oder einen davor und den anderen dahinter an.

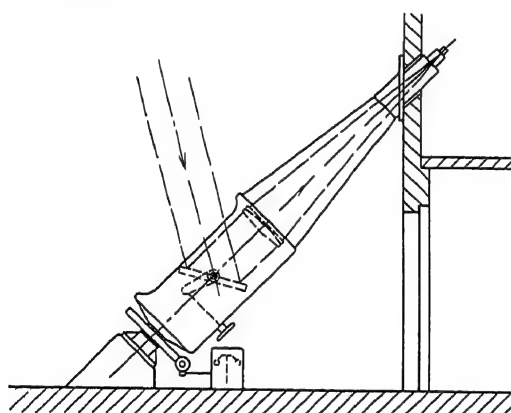


Abb 98 Ein Fernrohr mit Polarheliostat

Der Vorschlag von BRASHEAR und BROOKS⁴ (Abb 96) unterscheidet sich von dem letzten nur durch entgegengesetzten Einblick, PORTIER⁵ ordnet beide Spiegel zwischen Objektiv und Okular an, möglichst dicht am Okular (Abb 97).

Der feste Einblick in Richtung der Polarachse kann nun auch mit einem Planspiegel in der verschiedensten Weise erreicht werden, allerdings unter Verzicht auf Beobachtung in der Nähe des Pols. Am einfachsten ist die Verbindung eines Fernrohrs in der Polarachse mit dem Polarheliostaten von BOFFAT⁶ (Abb 98), solche Fern-

rohre wurden für die Steinwaite in Cork⁷ (Irland), in Harvard und in Yale⁸ (Loomis-Refraktor) gebaut. Bringt man den Spiegel zwischen dem Objektiv

¹ C R 106, S 704f (1888)

² HERMITE, C R 99, S 230 (1884), HAMY, ebenda 159, S 505 (1914), LINDEMANN, A N 164, S 389 (1904)

³ B A 1, S 265 (1884)

⁴ PORTER, Pop Astr 25, S 296 (1917)

⁵ Scient Amer 1926, S 164

⁶ J des Savants 1682, S 339

⁷ GRUBB, Proc R Soc Dublin 2, S 362 (1880), KONKOLY, Anleitung zu astronomischen Beobachtungen, S 620 Braunschweig Vieweg 1883

⁸ SCHLESINGER, Pop Astr 31, S 77 (1923)

und dessen Brennebene an, so muß der Spiegel mit dem Objektivarm auf halbe Drehung gekuppelt sein, wie es GRUBB¹ für Cambridge ausführte (Abb 99) Diese Bauart läßt sich auch nach dem Vorschlag von RANYARD² auf das Spiegelfernrohr von NASMYTH übertragen (Abb 100) Sie wurde bei dem COMMONSchen Spiegelfernrohr von 5' Öffnung angewandt, das später in den Besitz des Harvard College übergang³, und bei den großen Spiegelfernrohren auf Mt Wilson und in Córdoba, die auch die Benutzung nach NEWTON und NASMYTH gestatten Endlich hat man auch das Spiegelfernrohr von MARTIN in verschiedener Weise für festen Einblick in der Polarachse anzupassen versucht Man kann hier die Okularachse entweder in die Deklinations- oder in die Stundenachse legen⁴, im ersten Fall verzichtet man allerdings auf den festen Einblick, dafür fällt aber die Spiegelkippung fort Statt

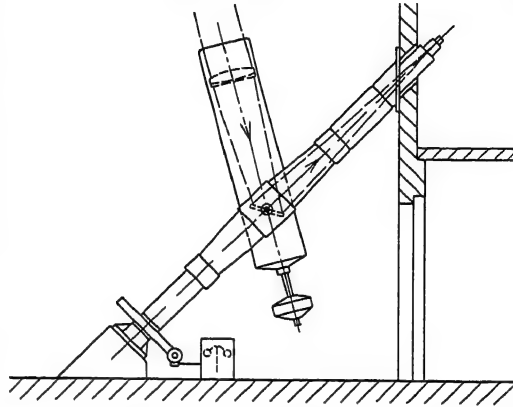


Abb 99 Ein Fernrohr mit innerem Polarheliostat

hier den großen Spiegel zu durchbohren, kann man auch davor einen kleinen Fangspiegel anordnen⁵ Eine solche Anordnung wurde für Port Clyde ausgeführt

FOUCAULT⁶ kam zuerst (1868) auf den Gedanken, einen Heliostaten, und zwar seinen gegen die ursprüngliche Form von FAHRENHEIT⁷ verbesserten, mit einem festen Fernrohr zu verbinden, und zwar wählte er ein liegendes, er nannte den Heliostaten daher Siderostat Ein solches photographisches Fernrohr wurde von LAUSSEDT⁸ für die Beobachtung des Venusdurchgangs 1874 vorgeschlagen und auch benutzt Von dieser Art war auch das große Fernrohr für die Pariser Weltausstellung 1900 von 1,25 m Durchmesser und 60 m Brennweite⁹ Bei dieser Anordnung findet eine Drehung des Bildes auf der Platte mit der taglichen Bewegung statt, die von CORNU untersucht wurde Er selbst¹⁰ und

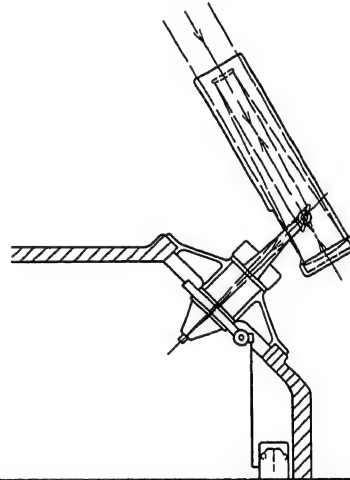


Abb 100 Das Spiegelfernrohr nach RANYARD

¹ Trans R Soc Dublin 3, S 61 (1884), BALL, MN 59, S 152 (1899)

² WADSWORTH, Ap J 5, S 132 (1897)

³ Pop Astr 14, S 142 (1906)

⁴ COMMON, MN 50, S 402 (1890), DAVIES, ebenda 55, S 400 (1895), SCHAEER, AN 165, S 346 (1904), PORTER, Pop Astr 29, S 249 (1921)

⁵ COMMON, MN 44, S 366 (1884), PORTER, Pop Astr 24, S 308 (1916)

⁶ CR 54, S 618, 55, S 644 (1862), 66, S 389 (1868), Franz Patent 53377 1862

⁷ s'GRAVESANDE, Physices elementa math Leyden, 3 Aufl, II, S 715 1742

⁸ CR 79, S 455 (1874)

⁹ GAUTIER, Ann Bur des Long 1899, Bull Soc Astr Belg 4, S 111, Zf Instrk 19, S 150 (1899), LOEHR, Mechaniker 7, S 76 (1899)

¹⁰ CORNU, CR 130, S 537, J de Phys (3) 9, S 249, BA 17, S 49, Ap J 11, S 148 (1900), CR 132, S 1013 (1901)

andere¹ gaben Einrichtungen zum selbsttätigen Nachziehen der Platte an. Auch beim Spiegelfernrohr von MARTIN hat man den großen Spiegel als Siderostaten ausgebildet sowohl für stehendes (AMICI²) wie für liegendes³ Fernrohr, AMICI ist so als Vorgänger FOUCAULTS anzusehen. Der Siderostat hat folgende Nachteile. Man kann nicht den ganzen Himmel beobachten, der Einfallswinkel des Spiegels ist veränderlich, bei großem wird ein Teil des Lichtes abgeblendet, die Bild-drehung macht die Messung von Rektaszensionsunterschieden und von Doppelsternen unmöglich. Dabei wird ihm heute der Coelostat von AUGUST⁴ vorgezogen, bei dem der Spiegel der Polarachse parallel ist und um sie gedreht wird, wenn nötig, werden die Strahlen über einen Hilfsspiegel geleitet. Das Fernrohr kann hier nicht beliebig in der waagerechten Ebene gerichtet sein, man richtet es auf die Stelle des Auf- oder Untergangs des Sterns. Günstigere Ausnutzung des Spiegels infolge kleineren Einfallswinkels erhält man, wenn das Fernrohr geneigt ist oder ein Hilfsspiegel verwendet wird. Eine zusammenfassende Übersicht und Theorie

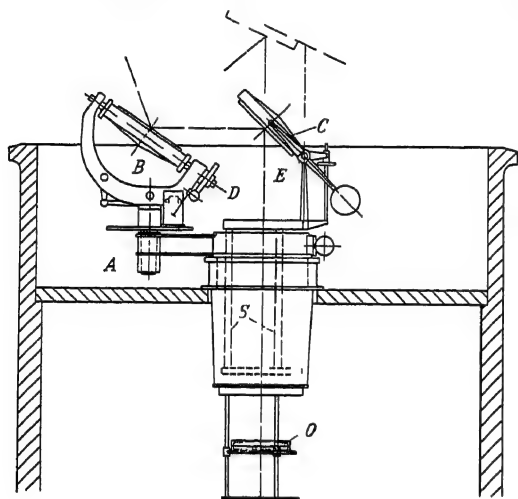


Abb 101 Das Potsdamer Turmfernrohr

für den Helio- und Coelostat gibt W. HARTMANN⁵, der auch den für die Hamburger Sternwarte ausgeführten Uranostaten behandelt. Bei dem waagerechten Fernrohr auf Mt. Wilson⁶, das von SNOW gestiftet wurde, werden die Strahlen nach Reflexion am Coelostaten durch einen zweiten Spiegel mit 6° Neigung gegen die Horizontale auf einen der auswechselbaren Hohlspiegel von 61 cm Öffnung und 18,3 bzw. 43,6 m Brennweite geleitet, der Achsenstrahl verläuft zuletzt horizontal. Noch besser hat sich das HALEsche Turmfernrohr⁷ der gleichen Sternwarte mit einem Objektiv von 30,5 cm Öffnung und 18,29 m Brennweite bewahrt,

da die Störungen durch Luftunruhe bei der senkrechten Anordnung der Fernrohrachse geringer sind. Bei einem zweiten, später gebauten Turm hat das Objektiv von gleicher Öffnung 45,7 m Brennweite. Bei dem Coelostaten des Potsdamer Turmfernrohrs⁸ ($D = 60$, $F = 1450$ cm) (Abb 101) kann das ganze System der beiden Spiegel B und C um die Achse des Objektivs O um $\pm 90^\circ$ gedreht werden. Der Hauptspiegel B kann um die Achse A zurück-

¹ LIPP-MANN, C R 132 S 931, J de Phys 10, S 415 (1901), TURNER, M N 61, S 122 (1901), PLUMMER, ebenda 61, S 402 (1901)

² v. BIELA, A N 5, S 425 (1827)

³ ANTHONY, M N 61, S 610 (1901)

⁴ RADICKE, Handbuch der Optik Berlin Nicolai 1839, FISCHER, I chbuch der mechanischen Naturlehre Berlin Nauck 1840 4 Aufl., Bd 2, S 340, GRUHL Pogg Ann 72, S 432 (1847) LITROW, Wiener Ber 48 II, S 337 (1863), LIPP-MANN C R 120, S 1015 (1895), TURNER, M N 56, S 408 (1896), DAVIES J B A A 12, S 359 (1902) BIGOURDAN, B A 22, S 80 (1905), v. KRIEGER, Z f Instrk 52, S 381 (1932)

⁵ Astr Abh v Hamburg-Bergedorf 4, S 1 (1928)

⁶ HALE, Ap J 23, S 6 (1906), ARBOI, Smithsonian Misc Coll 45 (1903)

⁷ HALE, Ap J 25, S 68 (1907), 27, S 204 (1908), VAN MAANEN, J Can R A S 11, S 223 (1918)

⁸ v. D PAHLEN, Z f Instrk 46, S 49 (1926), FREUNDLICH, Das Teleskop der Einsteinstiftung Berlin Julius Springer 1927

gedreht werden. Wenn die Teilkreise für beide Drehungen gleich anzeigen, steht die im Hauptspiegel *B* liegende Achse *D* der Weltachse parallel. Zur Anpassung an die Neigung der vom Hauptspiegel zurückgeworfenen Strahlen kann der Hilfsspiegel *C* um die waagerechte Achse *E* gekippt und sein Traggestell mit den drei Säulen *S* gehoben und gesenkt werden. Es sei noch auf Abb 14, S 71 im 4. Bande dieses Handbuchs verwiesen. Auf die Verbindung eines senkrechten Fernrohrs mit einem Flüssigkeitshorizont soll hier nicht eingegangen werden.¹

Beim Planspiegel mit schrägem Lichteinfall sind Formänderungen durch Schwere und Wärme viel gefährlicher als beim Parabolspiegel des Reflektors.² Biegt sich der letzte Spiegel bei einem Durchmesser von $2r = 100$ cm um $v = 1 \mu$ durch, so ist die Änderung der Krümmung $\Delta \rho = 2v/r^2 = 0,8 \cdot 10^{-7}$ und die Änderung der Brennweite $\Delta f = -2f^2/\Delta \rho$ für $f = 1000$ cm gleich 0,16 cm. Durch eine solche Änderung entsteht beim Einfallswinkel i Astigmatismus a , den man mit Hilfe von Formel (28) Ziff 9 berechnen kann, wenn man $s = t = r = \infty$ und $n = -1$ setzt. Man findet

$$a = 2f^2 \left(\frac{1}{\cos i} - \cos i \right) \Delta \rho \quad (83)$$

Wird das vom Zenit kommende Licht durch einen Planspiegel unter 45° in ein liegendes Fernrohr von der Brennweite 1000 cm reflektiert, so ist $a = 0,113$ cm, das ist etwa das 14fache der COUDERSchen Grenze für den Astigmatismus (Ziff 32). Änderungen der Form sind besonders bei Sonnenbeobachtungen zu befürchten. Bei dem SNOWschen Fernrohr beobachtete man Brennweitenänderungen von mehreren Zoll nach 10 Minuten Exposition, die allerdings wohl zum Teil auf die Änderungen des Hohlspiegels zurückzuführen sind, doch zeigte das Auftreten von Astigmatismus an, daß der Planspiegel mitwirkte. Beim HALESchen Turmfernrohr tritt nach halbstündiger Exposition keine merkliche Änderung der Brennweite ein, allerdings sind der kreisförmige Spiegel von 42,3 cm und der elliptische von 56,5 und 32,4 cm Durchmesser $30\frac{1}{2}$ cm dick. PELLIER³ verglich verschiedene Planspiegel von 10 bis 30 Zoll Durchmesser bezüglich der Änderung der Brennweite, wenn sie mehrere Stunden Sonnenstrahlen ausgesetzt waren. Im allgemeinen wurden die Spiegel hohl, nur der Metallspiegel und der 30zöllige Spiegel des SNOWschen Fernrohrs wurden erhaben. Am besten bewahrte sich Spiegelmetall und Pyrexglas, da hier nach 1 Stunde keine weitere Änderung der Fläche eintrat. HALF⁴ bestimmte an einem Modell die Polarisation bei verschiedenen Stellungen der Spiegel, um magnetische Erscheinungen auf der Sonne untersuchen zu können.

60 Die großen Spiegelfernrohre Aus der Aufstellung von HOLLIS u. a. (Ziff 44) über die großen Spiegelfernrohre bis zu 20' herab mag hier ein Auszug mit Ergänzung gegeben werden (S 182).

Von besonders großen Spiegelfernrohren sind zur Zeit in Arbeit ein solches von 1,88 m Durchmesser 1 4,86 für das Dunlap Obs. in Toronto bei GRUBB und ein solches von 1,52 m Durchmesser 1 5,5 für die Oak Ridge Station des Harvard College, Cambridge, U.S.A., bei FICKER. Die außer Gebrauch befindlichen Spiegelfernrohre von HERSCHEL (S 171), Lord ROSSE (91 und 184 cm)⁵ und das von ihm selbst vor seinem Tode zerstörte von LASSELL (120 cm)⁶ seien

¹ AIRY, Explanation of a proposed Construction of Zenith Sector 1848, A N 102, S 143 (1882), M N 46, S 205 (1886), CHANDLER, ebenda 62, S 122 (1902), PORRO, C R 36, S 482 (1853), A N 48, S 65 (1858), ABBL, ebenda 127, S 89 (1891).

² COUDER, B A 7, S 209 u. 227 (1932).

³ Ap J 58, S 208 (1923).

⁴ Publ A S P 24, S 73 (1912).

⁵ Phil Trans 1840, S 503, 151, S 681 (1861), DREYER, Obs 37, S 262 u. 399 (1914).

⁶ STRUVE, B A C St Petersburg 7 (Nov 1863), LASSELL, A N 63, S 369 (1865), Cais Rep 1, S 162 (1866), Mem R A S 36, S 1 (1867).

Liste der Reflektoren mit 80 cm Öffnung und mehr

Öffnung in cm	Öffnungsverhältnis des Hauptspiegels	Ort () Muttersteinwarte	Geschliffen von (Ungeschliffen von)	Im Jahr	Bauart	Technische konstante T _z (Ziff 72) Durchmesser des Zer- streuungskreises Z
80	1 4	Jenkinstown, Mt GIBSON	FECKER	1930	NEWTON u CASSEGRAIN	
80	1 5 6	Marsville	POUCAUT	1873	NEWTON	
81	1 6	Forcalquier, Haute Pro- vence	COUDLA	1932	NEWTON u CASSEGRAIN ¹	
82	1 12	La Plata	HENRY (ZEISS)	vor 1900 (1930)	NEWTON u CASSEGRAIN	
83	1 6	Toulouse	SÉRLIAN	1891	NEWTON	Z = 0,2 mm
91	1 3,7	Cambridge, England	CALVER	1890	NEWTON	
91	1 5	Tucson, Arizona, Steward Obs	McDOWELL	1921	NEWTON u CASSGRAIN	
91	1 5	Edinburgh	GRUBB	1929	CASSEGRAIN ²	
91	1 5	Greenwich	GRUBB	1933	CASSGRAIN	T = 0,248
91	1 5	Ann Arbor, Michigan	BRASHFAR	1907	CASSGRAIN	
92	1 5,8	Mt Hamilton, Lick Obs, CROSSLY-Reflektor	CALVER (GRUBB)	1879	NEWTON ³	
93	1 5,6	Santiago, vorher MILLS Expedition	BRASHFAR	1911	CASSEGRAIN ⁴	
100	1 3	Meudon	HLNRY	1886	NEWTON	T = 0,135
100	1 2,95	Jungfrauoch (Genl), zu Zeit im Umbau	SCHALR	1911	CASSEGRAIN ⁵	
100	1 3	Genl	SCHALR	1918	CASSEGRAIN ⁵	
100	1 2,93	Uccle b Brussel	ZLIS	1932	CASSEGRAIN	
100	1 3	Hamburg-Bergedorf	ZLIS	1911	NEWTON ⁶	T = 0,135
100	1 5	Mcate b Mailand	ZLIS	1926	NEWTON u CASSEGRAIN ⁷	
100	1 4,5	Stockholm	GRUBB	1930	NEWTON u CASSGRAIN ⁸	
102	1 5	Flagstaff, Arizona, Lowell Obs	CARK	1909	CASSGRAIN ⁹	
102	1 5	Krim, Simis Obs	GRUBB	1923	NEWTON u NASMYTH ¹⁰	Z = 0,036
122	1 7 6	Melbourne	GRUBB	1870	CASSEGRAIN ¹¹	
120	1 6,5	Paris	MARTIN (COUDIER)	1875 (1932)	NEWTON ¹²	
125	1 6,7	Berlin-Babelsberg	ZEISS	1923	NEWTON u NASMYTH ¹³	
152	1 5,4	Bloomfontein, S A (Har- vard Coll Cambridge, U S A)	CALVER (LICHTER)	1891 (1929)	COMMON ¹⁴	T = 0,14
152	1 5	Mt Wilson	RITCHIE	1909	NEWTON u RANYARD ¹⁵	
152	1 5	Córdoba, Argentinien	McDOWELL	1922	NEWTON u RANYARD ¹⁶	
172	1 4,35	Delaware (Ohio), Perkins Obs	LECHER	1932	NEWTON u CASSGRAIN ¹⁷	
184	1 5	Victoria, Canada	BRASHFAR	1922	NEWTON u CASSEGRAIN ¹⁸	
258	1 5	Mt Wilson	RITCHIE	1921	NEWTON u RANYARD ¹⁹	

¹ BSAF 47, S 297 (1933)² SAMPSON, Obs 52, S 293 (1929), YOUNG, Trans Opt Soc 31, S 219 (1930) SCHOLT, Himmelswelt 40, S 8 (1930), GRUBB, Engineering 78 S 288 (1929)³ KEFLER, Ap J 11, S 325 (1900), Publ Lick Obs 8, S 7 (1908)⁴ WRIGHT, Publ Lick Obs 9, S 25 (1911)⁵ SCHAEER, Arch sc phys nat 33, S 200 (1912), GIERCK, Publ Obs Geneva, S 253 (1932), VJS 68, S 178 (1933)⁶ Mitt Sternw Hamburg-Bergedorf 1912⁷ MARTIN u GIOTTI, Mem Soc Astr It 4 (1927), GIOTTI, Publ Obs di Mcate 1 II (1929)⁸ Minneskift Stockholm Obs Stockholm Vetenskapsakad 1931⁹ Obs 32, S 336 (1909)¹⁰ GRUBB, J of Scient Instr 2, S 1 (1924) SHAJN, Bull Pulkowa 10, S 450 (1926)¹¹ ROBINSON u GRUBB, Phil Trans 159, S 127 (1869)¹² Nature 13, S 229 (1875), COUDIER, BA 7, S 423 (1931)

nur erwähnt. Für die beiden größten Spiegelfernrohre seien hier noch einige Angaben gemacht. Es bezeichnet f_1 die Brennweite des Hauptspiegels, D_1 seinen Durchmesser, d_1 seine Randdicke, P_1 sein Gewicht, f_2 bzw. D_2 die Brennweite bzw. den Durchmesser des erhabenen Fangspiegels, A den Abstand des Fangspiegels vom Hauptspiegel, F die Gesamtbrennweite. Es gilt nun für das große Spiegelfernrohr auf Mt. Wilson $D_1 = 258$ cm, $f_1 = 12,88$ m, $d_1 = 32,38$ cm, $P_1 = 4082$ kg, $D_2 = 73$ bzw. $63,5$ cm, $F = 40,8$ bzw. $76,5$ m. Die Langsabweichung des Hauptspiegels beträgt nicht mehr als $0,14$ mm, der Spiegel wird durch Wasserheizung auf konstanter Temperatur gehalten. Die ganze Luftmasse der Kuppel von 3360 m³ wird während des Tages abgeschlossen, erst am Abend werden Türen und Fenster kurze Zeit geöffnet, um kräftig zu ventilieren. Für den Victoria-Spiegel ist $D_1 = 184$ cm, $f_1 = 9,18$ m, der Ausbruch in der Mitte hat $25,7$ cm Durchmesser, P_1 ist 1960 kg, $f_2 = 3,03$ m, $D_2 = 50,8$ cm, $A = 7$ m, $F = 32,92$ m. Die größte Langsabweichung beträgt $0,25$ mm, und zwar für die Zone von 96 cm Durchmesser. Hier sind der Spiegel auf der Unterseite und am Rande und ebenso der geschlossene Teil des Rohres durch Steppdecken, die mit Wollfilz gefüllt sind, isoliert, ein gleicher Wärmeschutz auf der Oberseite wird erst vor der Beobachtung entfernt. In der Nähe des Spiegels ist so die Temperaturänderung nur ein Drittel von der in der Kuppel. Auf diese Weise wurde das Schutzdach aus Wollsteppdecken, das bei dem $2,5$ -m-Spiegel vorgesehen ist, entbehrlich.

Ein schwerlich ausführbarer Vorschlag von SYNGE¹ sei nur kurz erwähnt. Er ersetzt ein großes Spiegelfernrohr durch eine Gruppe kleinerer, deren Strahlen einem gemeinsamen Fernrohr zugeführt werden.

Über die Herstellung der Fernrohre findet man vielfach Angaben bei den Beschreibungen größerer Fernrohre, einige andere Quellen² seien noch angeführt, auch betreffend Poliermaschinen³ und Selbsterstellung von Spiegelfernrohren⁴. Endlich sei noch auf das AMBRONNSche Handbuch⁵ verwiesen.

¹ Phil Mag 10, S 353 (1930)

² LASSELL, Mem R A S 18, S 1 (1850), HERSCHELL, The Telescope Edinburgh Black 1861, COMMON, M N 39, S 382 (1879), Mem R A S 46, S 73 (1880/1), 50, S 113 (1890/1), CALVER, M N 40, S 17 (1880), GRUBB, Nature 34, S 85 (1886), Z f Instik 7, S 101 (1887), SIRIUS 20, S 7 (1887), CLARK, B S A F 8, S 13 (1894), MAILHAT, ebenda 8, S 123 (1894), SARAŃIK, Centi Z f Opt u Mech 15, S 207 (1894), SCHRODER, ebenda 18, S 71 (1897), 20, S 113 (1899), RITCHIE, Smithsonian Contr to Knowl 34 V (1904), Ap J 19, S 59 (1904), TAYLOR, Proc Opt Convention 1926, S 604, COUDLER, B A 7, S 237 (1932)

³ OSMANTOWN (ROSSE), Phil Trans 1840, S 503, LASSELL, M N 9, S 29 (1849), Phil Trans 165 S 303 (1875)

⁴ v KRUDY u v BRUNN, D moderne Spiegelteleskop i d Astronomie 2 Aufl Leipzig Barth 1930, MIEHE, Selbsterstellung d Spiegelteleskops Stuttgart Franckh 1920, BEIL, The Telescope New York McGraw Hill 1922, WARRIN DE LA RUE, M N 13, S 45 (1852), INCAILS, Amateur Telescope Making Scient Amer Publ 1926

⁵ Handbuch d astronomischen Instrumentenkunde Berlin Julius Springer 1899

Fortsetzung der Fußnoten von S 182

¹³ SFRUVE, Berlin-Babelsberg Veroff 3, Heft 1 (1919), GUTHNICK, VJS 68, S 119 (1933)

¹⁴ Mem R A S 50, S 113 (1890/1)

¹⁵ RITCHIE, Ap J 29, S 198 (1909), 32, S 26 (1910)

¹⁶ Pop Asti 30, S 593 (1922)

¹⁷ FECKER, J Can R A S 24, S 297 (1930), SRETSON, Publ A A S 7, S 36 (1930), J Opt Soc Amer 23, S 293 (1933)

¹⁸ PLASKETT, Pop Astr 27, S 210 (1919), Publ A S P 30, S 267 (1918), J Can R A S 14, S 177 (1920), Ap J 49, S 209 (1919), Publ Dom Obs Victoria 1, Nr 1 (1920), siehe ferner Engineering 112, S 207 (1921)

¹⁹ HALE, Pop Astr 27, S 563 (1919), Ann Rep of Mt Wilson Obs 18, S 217 (1919), siehe ferner Pop Astr 29, S 269 (1921), Centr Z f Opt u Mech 43, S 373 (1922)

d) Die Prüfung des Fernrohrs

61 Einleitung Die Prüfung optischer Geräte dient dazu, ein Urteil über die Leistung, insbesondere die Güte der Abbildung zu begründen und ihre Wirkungsweise zu verstehen, wie sie sich aus den gemessenen Grundgrößen der Abbildung, d. h. Brennweiten, Brennpunktsorten, Vergrößerung, Gesichtsfeld, Lichtstärke, und aus den Aberrationen ergibt. Da es sich bei den Objektiven für astronomische Zwecke vorwiegend um Beobachtung entfernter Gegenstände handelt, solche aber bei manchen Anordnungen nicht bequem zur Verfügung stehen, spielt der Ersatz des Fernziels durch einen Kollimator eine besondere Rolle, dieser besteht aus einem Objektiv, in dessen Brennpunkt sich eine beleuchtete Marke befindet und das daher diese Marke im Unendlichen abbildet. Hat man den Abstand der Marke vom Objektiv genau für parallel austretende Strahlen abgestimmt, so kann er als Ersatz eines unendlich fernen Bildpunktes dienen. Die Öffnung des Kollimators sollte nicht kleiner sein als die des Objektives, seine Brennweite nicht zu kurz, damit die Aberrationen gering sind und seine Marke genau an die richtige Stelle gebracht werden kann. Ist seine Brennweite F länger, so ist zwar die Bestimmung der Lage seines Brennpunktes bei gleicher

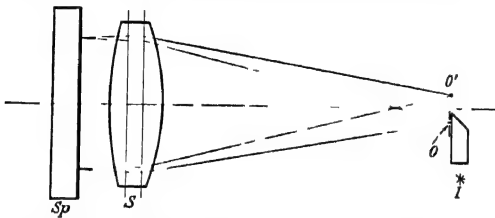


Abb 102 Die Anordnung für Autokollimation

Öffnung proportional der längeren Brennweite ungenauer, aber ein Fehler in der Einstellung des Kollimators macht sich in der Brennpunktslage des zu untersuchenden Objektives mit der Brennweite f nur im Verhältnis f^2/F^2 geltend. Hat man drei Kollimatoren oder Fernrohre zur Verfügung, so kann man sie ohne entferntes Ziel richtig einstellen, wenn nämlich alle drei zu je zweien aufeinandergerichtet keine Parallaxe zeigen, sind alle drei richtig eingestellt. Oft wird auch das Verfahren der Autokollimation angewandt (Abb 102). Mit Reflexionsprisma und wenn nötig Beleuchtungslinse, die die Lichtquelle L auf einer Lochblende O abbilden, wird ein Lichtpunkt möglichst dicht neben dem Brennpunkt des Objektives erzeugt. Die davon ausgehenden Strahlen durchsetzen das Objektiv S und werden von einem zur Achse senkrechten geprüften Planspiegel Sp nahe in sich zurückgeworfen. Sie durchsetzen dann das Objektiv zum zweitenmal und vereinigen sich auf der anderen Seite in O' neben dem Brennpunkt. Die Abweichungen sind verdoppelt, das Verfahren ist daher doppelt so empfindlich. SCHROEDER¹ ordnet für doppelte Autokollimation im Brennpunkt noch einen parallelen kleinen Spiegel an. Bei ruhiger Aufstellung und senkrechter optischer Achse kann auch ein Quecksilberhorizont als Planspiegel dienen. Der Planspiegel muß natürlich eine für den jeweiligen Zweck genügend genaue Ebene sein (über die Prüfung s. Ziff 76). Für manche Zwecke, z. B. die Prüfung der Fehler außer der Achse, ist es vorteilhaft, wenn der Kollimator um die Eintrittspupille des zu prüfenden Objektives geschwenkt werden kann wie der Kollimator eines Spektrometers oder wenn das Objektiv auf einem sog. Knotenpunktschlitten (Tourniquet, nodal slide) drehbar angeordnet ist.² Ein solcher bildet einen Teil des in Abb 105 abgebildeten Geräts. Das Objektiv I kann mit einem Kreuzschlitten quer zu und längs seiner optischen Achse verschoben werden, bis es mit seinem hinteren Knotenpunkt, hier identisch mit dem hinteren Hauptpunkt, über dem Drehpunkt des das Objektiv tragenden

¹ Z f Instrk 12, S 153 (1892)

² KINGSLAKL, J Opt Soc Amer 22, S 207 (1932)

Armes Q steht. Soweit es sich nun um Objektive handelt, die ein annähernd ebenes Bildfeld haben, ist es angenehm, wenn die Platte, auf der das Bild des Objektivs aufgenommen wird, oder das zum Beobachten des Bildes dienende Okular bzw. Mikroskop selbsttätig in Richtung der Kollimatorachse so bewegt wird, daß die Einstellung für die Brennebene des zu prüfenden Objektivs bei der Drehung erhalten bleibt.

Da eine genaue Messung der Grundgrößen eine Berücksichtigung der nicht gehobenen Abbildungsfehler erfordert, ist es zweckmäßig, mit der Prüfung der sphärischen und chromatischen Aberrationen zu beginnen. Die zahlreichen, besonders in neuerer Zeit ausgebildeten Verfahren zur Prüfung der sphärischen Abweichung kann man nun grundsätzlich danach unterscheiden, ob die Abweichung der Wellenfläche, die gegen eine Bezugskugel in Richtung der Normalen dieser Kugel gemessen und die Deformation der Wellenfläche genannt wird, untersucht wird oder die Abweichung der Normalen dieser Wellenfläche, d. h. die sphärische Langs- oder Seitenabweichung dieser Strahlen, oder endlich die Abweichung der Krümmungsradien an den verschiedenen Stellen der Wellenfläche. Es mögen kurz die Beziehungen zwischen den Größen bei diesen verschiedenen Arten der Messung dargelegt werden. Bezeichnet man die Deformation mit δ , die Seitenabweichung der Mittelsenkrechten zur Schne, die durch den Scheitel geht, mit ε , die Seitenabweichung der Normale mit η , die Langsabweichung der Krümmung gemessen auf der Achse mit σ , den Radius der Scheitelkrümmung der Welle mit s_0 und den Abstand des Punktes der Welle von der Achse mit r , so gelten die Beziehungen

$$\delta = -\frac{r}{s_0} \varepsilon, \quad (84)$$

$$\eta = -s_0 \frac{d\delta}{dr}, \quad (85)$$

$$\sigma = -s_0 \frac{d\eta}{dr} \quad (86)$$

Rechnungsmaßig ist somit der Übergang von der einen Art gemessener Abweichung zu der gesuchten anderen immer möglich. Es kann aber oft erwünscht sein, die gesuchten Größen unmittelbar zu messen, so die Abweichung der Wellenfläche, wenn man durch nachträgliche Korrektur der Linsen- oder Spiegelflächen die Leistung verbessern will, oder die sphärische Langsabweichung, wenn man die Ausführung mit der Rechnung vergleichen will. Wir beginnen mit der Prüfung auf Deformation, schicken aber einiges über die Prüfung ohne besondere Hilfsmittel voraus.

62 Die Prüfung ohne besondere Hilfsmittel. Als Prüfobjekt für kleinere Fernrohre eignen sich Wetterfahnen, die sich gegen den hellen Himmel abheben, mehr zu empfehlen sind Prüftafeln¹ mit geometrischen Figuren sowie waagrechten und senkrechten Liniengruppen von verschiedener Feinheit, wie sie vielfach angegeben wurden. Zur Prüfung des Auflösungsvermögens solcher Fernrohre eignet sich das STAMPFERSche Gitter² (Abb. 103) oder besser ein Gitter, das in verschiedener Größe projiziert werden kann. Den Astigmatismus mißt man als den Unterschied der Einstellung für waagrechte und senkrechte Linien, außer der Achse arbeitet man mit radialen und tangentialen Linien. Zur Prüfung der sphärischen Abweichung in der Achse eignet sich ein dunkler Streifen auf hellem Grund, stellt man mit voller Öffnung scharf ein und blendet die eine Objektiv-



Abb. 103
STAMPFERS
Gitter zur
Prüfung des
Auflösungs-
vermögens

¹ STRUVE, A N 13, S 29 (1836), BIGOURDAN, C R 160, S 18, MAHLKE, Dtsch opt Woch 1, S 225 (1916), VOLKMAN, SIRIUS 56, S 110 (1923)

² Prechtl's Jahrb 19, S 24 (1837), JEWELL, J Opt Soc Amer 2-3, S 51 (1919)

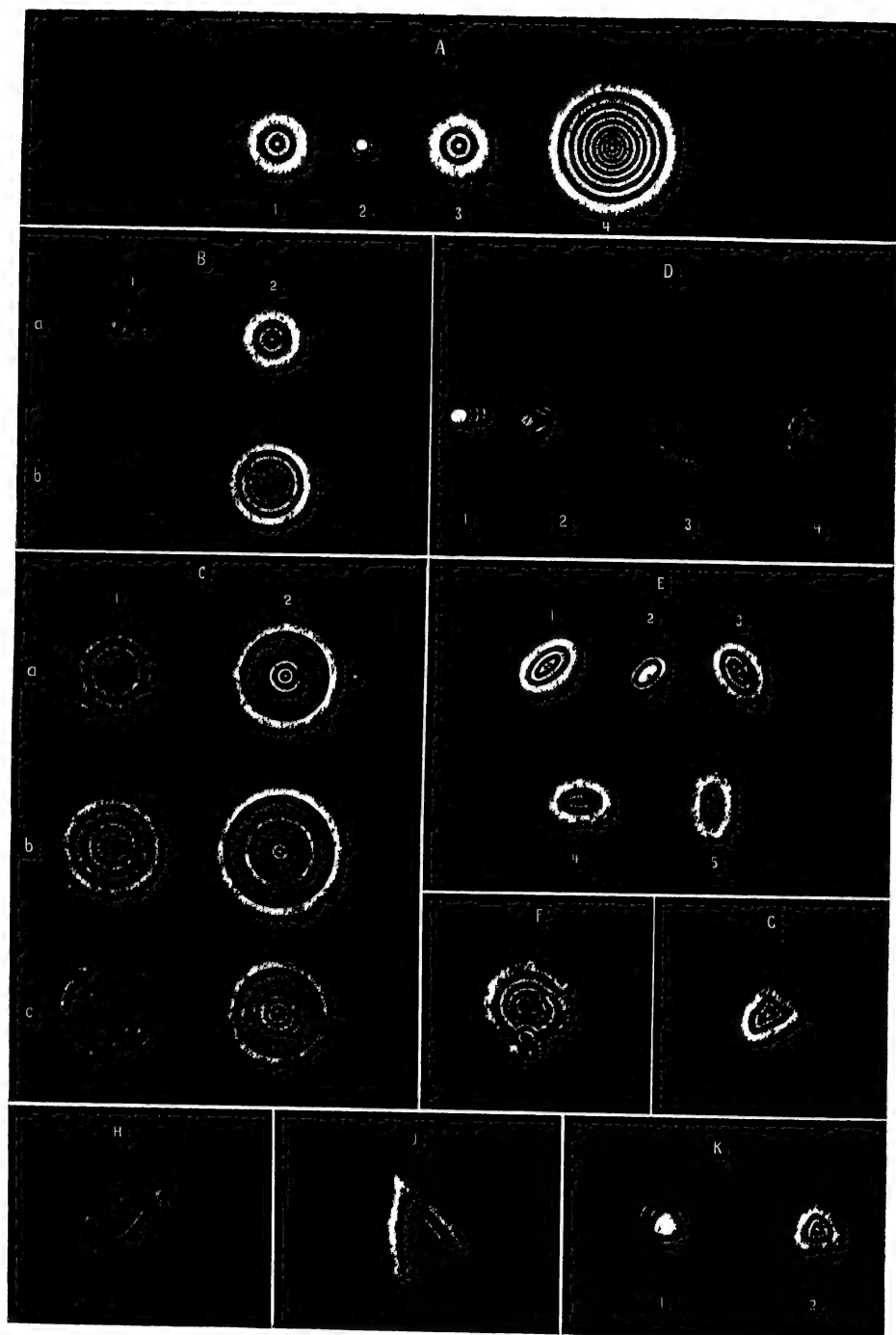


Abb 104 Beugungsbilder eines Sterns A für ein gutes Objektiv, B bei sphärischer Abweichung, C bei Zonen, D bei Koma, E bei Astigmatismus, F bei Schlieren, G, H, J bei Spannung, K bei Durchbiegung einer Linse (Nach Cooke and Sons)

halfte so ab, daß die Halftungslinie dem Streifen parallel ist, so wird die eine oder andere Kante unscharf, je nachdem Über- oder Unterkorrektion vorliegt. Die Abblendung kann auch dadurch erreicht werden, daß man das Auge seitlich bewegt und so mit dem Rand der Augenpupille die Austrittspupille abblendet. Das Objektiv allein kann man durch Parallaxe prüfen, stellt man bei sphärischer Abweichung auf die kleinste Parallaxe ein, so kehrt sich beim Bewegen des Auges in einem Sinn der Bewegungssinn des Bildpunktes um. Ebenso erkennt man nach NEWTON die Farbenabweichung durch Abblendung des halben Objektivs oder durch exzentrische Haltung des Auges. Bei richtiger Korrektion des Objektivs für Beobachtung treten infolge maßigen sekundären Spektrums an den Rändern des dunklen Streifens die zarten Mischfarben apfelgrün und rosa auf, Unter- bzw. Überverbesserung gibt sich durch Umschlagen der letzten Farbe in Kirschrot bzw. Gelb kund. Farbenabweichung der Vergrößerung erkennt man daran, daß auch bei zentraler Haltung und vollem Objektiv einseitige Farbensäume auftreten, die nach dem Rande des Gesichtsfeldes greller werden. Dort erkennt man auch an der Durchbiegung gerader Linien die Verzeichnung.

63 Die Prüfung des Beugungsscheibchens Auch größere Fernrohre kann man dadurch prüfen, daß man nach FOUCAULT¹ die Veränderung des Sternbildes beobachtet, die beim Heraus- und Hereinschieben des Okulars aus der Mittelstellung für ein scharfes Bild auftreten. Am besten wendet man eine mehrfache Übervergrößerung an, damit die Beugungsringe deutlich hervortreten. An der Hand von Bildern mögen die Erscheinungen bei guten und schlechten Objektiven beschrieben werden (Abb. 104). A 2 zeigt das Sternbild für ein gutes Objektiv im Brennpunkt, A 1, 3 und 4 nach Okularverstellung. B 1 bzw. 2 zeigt es bei sphärischer Überverbesserung verschiedener Größe innerhalb bzw. außerhalb des Brennpunktes oder bei Unterverbesserung außerhalb bzw. innerhalb des Brennpunktes. Stellt man bei sphärischer Unterverbesserung so weit vom Brennpunkt entfernt nach innen ein, daß drei oder vier Ringe sichtbar sind oder bei geringer sphärischer Abweichung noch weniger weit (2), so bemerkt man, daß die mittleren Ringe sehr schwach, die äußeren dagegen, und besonders der äußerste, scharf und hell aussehen, auf der andern Seite des Brennpunktes ist die Erscheinung komplementär. Zonenfehler äußern sich ebenfalls durch Lichtanhäufung in einzelnen Ringen (C), die Bilder 1 und 2 zeigen sie innerhalb bzw. außerhalb des Brennpunktes. Man erkennt sie am besten, wenn man bei maßiger Vergrößerung das Bild eines recht hellen Sterns noch weiter außerhalb des Brennpunktes betrachtet. D zeigt Koma in verschiedener Stärke und bei verschiedener Einstellung, E Astigmatismus, diese Fehler können in der Achse infolge Dejustierung des Objektivs und auch außer der Achse auftreten. F zeigt den Einfluß von Schlieren (Streifen abweichender Brechung S. 145), G, H, I den der Verspannung durch die Fassung, K den der Durchbiegung bei Auflage auf drei Punkten.

64 TWYMAN'S Interferometer Für die Feststellung der Deformation der Wellenfläche beim Durchgang durch ein optisches System wurde das MICHELSON'sche Interferometer von TWYMAN² in passender Weise abgeändert (Abb. 105). Das monochromatische Licht einer Quecksilberlampe A wird durch die Linse B auf der kleinen Kreisblende C abgebildet, die von hier ausgehenden Strahlen werden durch die Kollimatorlinse D parallel gemacht und treffen auf den halbdurchlässigen Spiegel E, der reflektierte Teil der Strahlen wird durch den Plan-

¹ C. R. 47, S. 958 (1858), Ann. de l'Obs. de Paris 5, S. 197 (1858), M. N. 19, S. 284 (1859), TAYLOR (Cooke and Sons), Z. f. Instr. 14, S. 113 (1894).

² Ap. J. 48, S. 256 (1918), Phil. Mag. 35, S. 49 (1918), Phot. J. 42, S. 239 (1918), Trans. Opt. Soc. 22, S. 174 (1921), Z. f. wiss. Phot. 22, S. 131 (1923), Phil. Mag. 42, S. 777 (1921), PERRY, Trans. Opt. Soc. 25, S. 97 (1923/4), BUTKOW, Z. f. Phys. 22, S. 384 (1924), 30, S. 268 (1924).

spiegel F , der in der Richtung seiner Normalen verschiebbar ist, in sich zurückgeworfen, durchsetzt E und wird durch die Linse G in der Blende H zu einem Bild von C vereinigt. Der andere Teil der Strahlen geht durch das zu prüfende Objektiv I und wird durch den erhabenen Kugelspiegel K , dessen Mittelpunkt

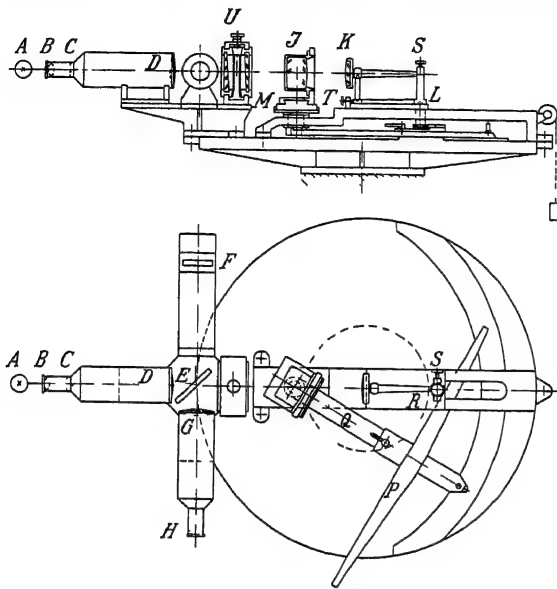


Abb 105 Das Interferometer von TWYMAN

gels K kann mit den Schrauben S in die optische Achse CDI des Objektivs und mit der Schraube T über die Achse L gebracht werden. Der Spiegelträger ist um die Achse schwenkbar, um den Spiegel zu untersuchen, und mit ihr in Richtung der optischen Achse des Objektivs verschiebbar, damit der Krümmungsmittelpunkt in den Brennpunkt des Objektivs gebracht werden kann. Das Objektiv kann mit einem Kreuzschlitten M quer zu und längs seiner optischen

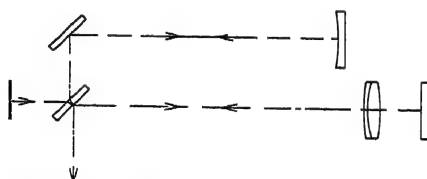


Abb 106 Die Prüfung großer Objektive nach TWYMAN

Achse verschoben werden, bis es mit seinem hinteren Knotenpunkt über der Achse steht, um die es mit dem Arm Q gedreht werden kann, damit auch die Wellenfläche für Bildpunkte außer der Achse untersucht werden kann. Es muß dabei der Krümmungsmittelpunkt des Spiegels K in der Brennebene gehalten werden, also Objektiv und Spiegel aus der Stellung in der Achse in die gezeichnete gebracht werden. Zu dem Zweck ist der Arm Q mit einem Querrarm P verbunden, der durch ein Gewicht gegen eine Rolle R gezogen wird, die bei der Stellung zur Untersuchung des Achsenbrennpunktes gerade unter der Schwenkachse des Spiegelträgers steht. Eine verbesserte Anordnung für universelle Verwendung beschreibt DOWELL¹. Abb 106 zeigt eine Anordnung zur Prüfung eines größeren Objektivs in Autokollimation. Nach HAY² werden größere Objektive in Teilen untersucht. Das zu prüfende Objektiv, der Kugelspiegel und der ebene Bezugs-

in den Brennpunkt des Objektivs fällt, in sich zurückgeworfen, es gibt nach dem Durchgang durch das Objektiv und die Linse G und nach Reflexion an E ebenfalls in der Blende H ein Bild von C . Bei geeignetem Abstände des Spiegels F beobachtet ein hinter H befindliches Auge auf dem Objektiv Interferenzkurven, die die Abweichungen der Wellenfläche infolge der Fehler des Objektivs in derselben Weise anzeigen wie die Abweichungen einer Planplatte bei Prüfung mit einem Probeglas die FIZEAUSCHEN Interferenzstreifen. Die Interferenzkurven geben die Abweichung der Wellenfläche in Schichtlinien. Der Krümmungsmittelpunkt des Spie-

gels K in der Brennebene gehalten werden, also Objektiv und Spiegel aus der Stellung in der Achse in die gezeichnete

¹ Proc Opt Convention 1926, S 1032

² Trans Opt Soc 31, S 91 (1929/30)

spiegel befinden sich auf einem gemeinsamen verschiebbaren Träger Zwischen dem Bezugsspiegel und der Teilungsplatte ist noch ein 45° -Spiegel eingeschaltet, damit die Senkrechte zum Bezugsspiegel der Objektivachse parallel ist

Die Abweichungen von der Wellenfläche können unmittelbar benutzt werden, um daraus die Definitionsgute abzuleiten Zwischen den Interferenzstreifen kann man weitere Linien gleichen Gangunterschiedes interpolieren, den Flächeninhalt F der Streifen zwischen aufeinanderfolgenden Linien bestimmen und die Großen F entsprechend dem Gangunterschied geometrisch addieren, ähnlich dem Verfahren mit CORNUS Spirale zur Auswertung der Beugungsintegrale, die Resultante der so aneinandergesetzten Strecken gibt den Lichtvektor, und sein Quadrat ist der Definition proportional Zu den einzelnen Bildfehlern gehören kennzeichnende Interferenzbilder, die dem geübten Beobachter mit einem Blick den Korrektionszustand enthüllen Abb 107 zeigt die Interferenzbilder für Zonen der sphärischen Abweichung für Einstellung -0.1 und 0 , für Koma für

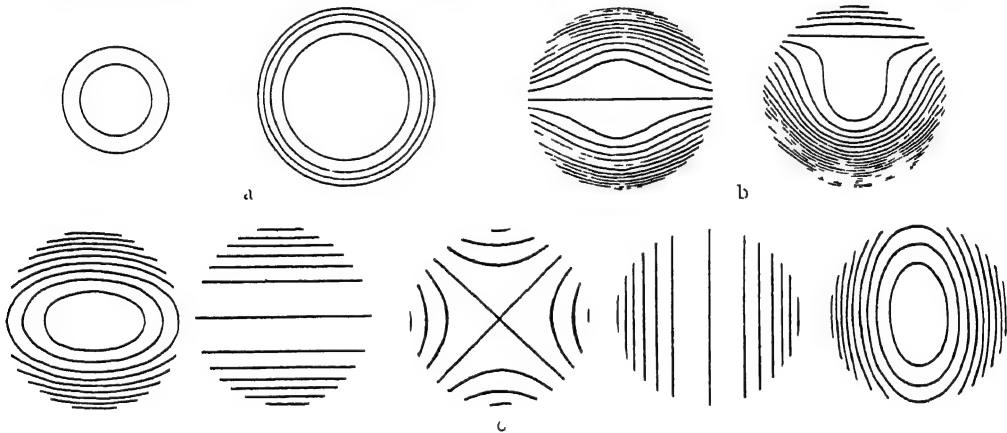


Abb 107 Interferenzbilder bei TWYMAN'S Verfahren a) sphärische Abweichung, b) Koma, c) Astigmatismus

Einstellung 0 und 0.136 und für Astigmatismus für Einstellung -0.1912 , -0.1234 , -0.0956 , -0.0478 , 0 Man kann nun auch auf Grund der Beziehungen zwischen Wellenfläche und Strahlenvereinigung auf rechnerischem Wege die Verbindung mit den Ergebnissen der trigonometrischen Durchrechnung herstellen Will man diese Rechnung vermeiden, so kann man mit Hilfe eines Drehkeilkompensators U (Abb 105) die Strahlen vor dem Auftreffen auf das Objektiv so ablenken, daß die breite Mitte des Interferenzbildes an die Stelle des Objektivs rückt, für die die Winkelabweichung des Strahles von dem der Kugelwelle entsprechenden gesucht wird und die durch die Ablenkung des Kompensators gemessen wird Der Kompensator dient auch dazu, die Verzeichnung im Winkelmaß zu geben Das Interferometer von TWYMAN ist besonders für die Werkstattuntersuchung von Objektiven mittlerer Größe geeignet, wie es die photographischen sind, es verlangt eine sorgfältige Justierung und eine sehr genaue Ausführung der drei Spiegel, auch ist es gegen ungleich erwärmte Luft empfindlich Die Genauigkeit wird zu $\lambda/4$ angegeben

65 WAETZMANN'S Verfahren WAETZMANN¹ benutzt eine von MASCARI und LUMMER behandelte Interferenzzeichnung Fallt ein Lichtstrahl (Abb 108)

¹ Ann d Phys (4) 39, S 1042 (1912), BRATKE u WALTMANN, Z f Phys 12, S 253 (1922) Naturwiss 12, S 225 (1923), BRATKE, Z f Phys 21, S 9, 23, S 239 (1924), HABIRLAND, ebenda 24, S 285 (1924)

auf eine planparallele Platte P auf, so wird er in zwei Strahlen 1 und 2 zerlegt, die im Brennpunkt F der Linse L vereinigt werden. Senkrecht zur optischen Achse ist ein Spiegel S angeordnet, der parallel zu sich selbst verschoben werden kann. Geht er durch F (Nullstellung), so treten nach Reflexion an S und Durchgang durch L die Strahlen parallel aus.

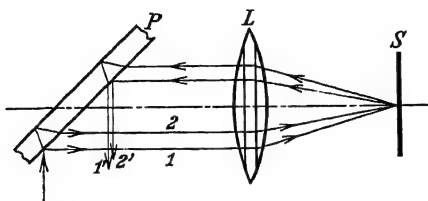


Abb 108 Zum Verfahren von WAETZMANN

Der an der Vorderfläche reflektierte Anteil $2'$ von 2 und der an der Hinterfläche reflektierte Anteil $1'$ von 1 haben den Gangunterschied Null. Fällt also ein Lichtbündel auf P auf, so erscheint das Gesichtsfeld des Okulars gleichmäßig hell. Wird aber der Spiegel um die Strecke e aus seiner Nullstellung verschoben, so treten die rückkehrenden Lichtstrahlen nicht mehr parallel aus der Linse aus, und man beobachtet mit dem Okular eine

Interferenzerscheinung. Bezeichnet a den Abstand der Strahlen 1 und 2 , y den Abstand des Strahls 2 von der Achse und f die Brennweite der Linse, so ist der Gangunterschied Δ in der Reflexionsebene, wenn die Strahlen $1'$ und $2'$ nur geringe Neigung gegen die Achse haben

$$\Delta = \frac{a(2y + a)e}{f^2} \quad (87)$$

Die Ausdehnung der Untersuchung auf Strahlen außerhalb der Reflexionsebene zeigt, daß die Interferenzerscheinung zu dieser Ebene senkrechte Streifen bildet, wenn aus größerer Entfernung und mit kleiner Eintrittspupille beobachtet wird.

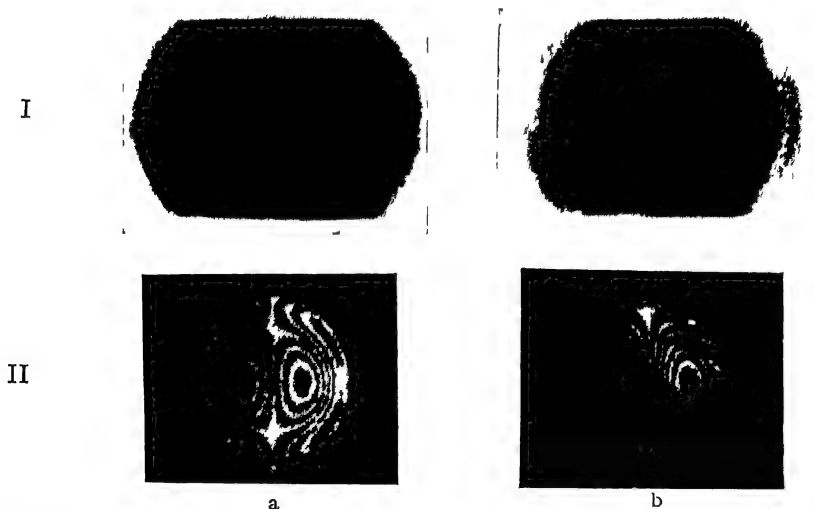


Abb 109 Interferenzbilder nach WAETZMANN I für gewöhnliche, II für zonale sphärische Abweichung, Spiegel a) außerhalb, b) innerhalb des Brennpunktes

Die Theorie führt aber nur dann zu dieser einfachen Interferenzerscheinung, wenn die Abbildung der Linse ideal ist, Abbildungsfehler der Linsen geben Abweichungen der Interferenzstreifen von der Geraden, aus denen rückwärts die Fehler der Linse ermittelt werden können. Abb 109 zeigt die Interferenzbilder für gewöhnliche sphärische Abweichung und für Zonen dieser Abweichungen bei den Spiegelstellungen etwas außerhalb und etwas innerhalb des Brennpunktes.

Das Verfahren verlangt, daß die etwa vorhandenen Fehler der Planplatte berücksichtigt werden. Da die rückkehrenden Strahlen das Objektiv in der gegenüberliegenden Stelle durchsetzen, so muß man die Achsensymmetrie der Objektive voraussetzen. Will man dies nicht, so wird eine zweite Linse und eine zweite Planplatte gebraucht.

66 RONCHIS Verfahren Die WAEITZMANNsche Interferenzerscheinung erhält RONCHI¹ mit einfacheren Mitteln (Abb 110). In die parallelen Strahlen, die von einem Kollimator mit Spalt kommen und durch das Objektiv L im Brennpunkt vereinigt werden, schaltet er vor dem Brennpunkt F ein Gitter R ein, so daß neben dem Spaltbild in F Beugungsspektren entstehen. Wirken nur die beiden ersten Ordnung mit, so erhält man auf dem Schirm S das daneben dargestellte Bild mit Interferenzstreifen. Der Abstand des ersten Spektrums vom Spaltbild ist $d = \gamma \lambda b$, wo $\gamma = RI$ und b das Gitterintervall ist. Die Streifenbreite ist $a = \lambda x - d$, wo $x = FS$ ist. Führt man die Frequenzen M und m gleich den Kehrwerten von a und b ein, so ist $M = m \gamma x$, der Spalt soll nicht breiter als $\lambda 2D$ sein, wo D der Durchmesser des Objektivs ist. Die Streifensysteme rücken ineinander, wenn $m\lambda$ gleich dem halben Öffnungswinkel des Objektivs ist. Man kann auch den Doppelspiegel und das Biprisma für den FRESNELschen Interferenzversuch benutzen. ANDERSON und PORTER² benutzen statt des Spaltes ein Gitter zur Vermehrung der Helligkeit. Bei ihrer Autokollimationsanordnung dienen die Hälften eines einzigen Gitters als die beiden Gitter. Sie landen das Verfahren ebenso genau wie das Messerschneiderverfahren (Ziff 70). Neben diesem Verfahren verwendet RONCHI auch Kombinationsinterferenzen, die durch zwei hintereinandergeschaltete Gitter erzeugt werden. Es sei a_1 bzw. a_2 der Abstand des ersten bzw. zweiten, dem ersten parallelen und zentrierten Gitters vom Mittelpunkt P der Kugelwelle, m_1 bzw. m_2 die Gitterfrequenz, und b der Abstand des Schirms von P , so gilt $M_1 = \frac{m_1 a_1}{b}$, $M_2 = \frac{m_2 a_2}{b}$, der Lichtleck P und die ersten seitlichen Spektren P'_1 und P'_2 neben ihm, die durch das erste und zweite Gitter entstehen, erzeugen Kombinationsinterferenzstreifen von der Frequenz $M' = M_1 - M_2$. Solche Kombinationsstreifen wurden schon von RAYLEIGH³ benutzt, um die Regelmäßigkeit von Beugungsgittern zu prüfen. Durch die Änderung des Abstandes der Gitter kann die Frequenz Null erreicht werden, und man kann so unmittelbar die Langsabweichung von Strahlen bestimmen. Endlich sei noch LENOUELS⁴ Anordnung (Astigmometer) beschrieben (Abb 111). Von der Lichtquelle S gehen Strahlen aus, die durch Doppelpfeile dargestellte Linsen vereinigen sie in der Nähe des Gitters, die Strahlen durchsetzen das zu prüfende Objektiv O ,

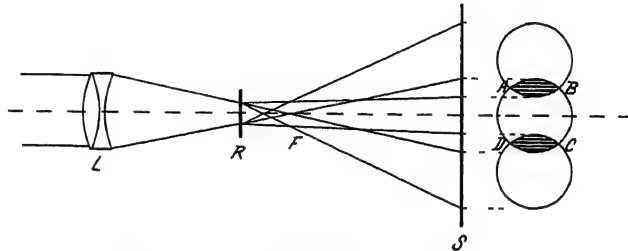


Abb 110 Zum Verfahren von RONCHI

¹ La prova dei sistemi ottici. Bologna. Zanichelli 1925, Ann Scuola N Sup Pisa 15 (1923) Rend Acc N Lincei 32, S 162 (1923), 33, S 23, 314 u 504 (1924), Nuovo Cimento 26, S 69 (1923), 1, S 209 (1924), 7, S 348 (1930), Z f Instrk 46, S 553, Rev d'Opt 5, S 441 (1926), FLÜGGE, Z f Instrk 46, S 209 (1926), 49, S 417 (1929), CICCONI, Nuovo Cimento 5, S 14 (1928), BRUSCAGLIONI, ebenda 9, S 23 (1932), Rend Acc N Lincei 15, S 70 (1932)

² Ap J 70, S 175 (1929)

³ Phil Mag 47, S 81 (1874)

⁴ Franz Patent 553611 (1922), 587034 (1924), Rev d'Opt 3, S 211 u 315 (1924), 4, S 294 (1925)

werden von dem Planspiegel V in sich zurückgeworfen und durch die schräge halbdurchlässige Planplatte in das Auge gelenkt JENTZSCH¹ hat ein Verfahren mit groberem Gitter ohne Beugungswirkung ausgearbeitet

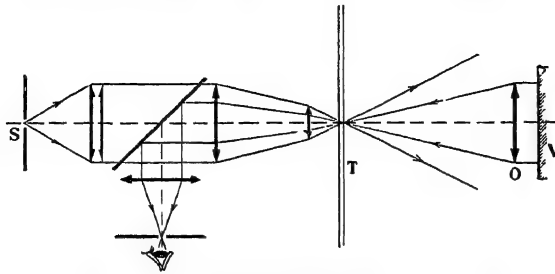


Abb 111 LENOUELS Verfahren mit Gitter

67 HARTMANN'S Verfahren

Zur Messung der Abweichungen größerer Objektive wird vorzugsweise das Verfahren von J HARTMANN² angewandt Nach ihm werden aus dem von einem Lichtpunkt ausgehenden Strahlenbündel Teilbündel ausgesondert, und zwar durch eine Blende vor dem

System, die eine große Anzahl von nach Azimut und Zonen symmetrisch angeordneten Kreislochern von passenden Größen (1 200 bis 1 400 der Brennweite) besitzt Die Lage der Achse der zugehörigen Bildbündel wird durch die Durchstoßungspunkte (Mitten der Zerstreuungskreise) mit zwei zur Systemachse senkrechten Ebenen bestimmt, die annähernd gleich viel so weit vor und hinter dem Bildort liegen, daß die Durchstoßungspunkte noch in der richtigen Folge angeordnet sind Statt der mikroskopischen Messung wird die photographische Aufnahme mit nachträglicher Messung durch den Komparator bevorzugt, wodurch die Fehler fortfallen, die mit dem Hintereinander der Einstellungen verbunden und für Unterschiedsmessungen besonders schädlich sind Werden (Abb 112) die Schnittweiten A auf der Achse und ebenso die Abstände A_1 und A_2

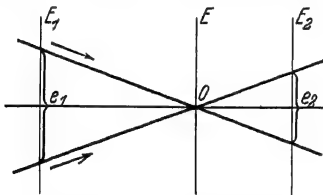


Abb 112 J u HARTMANN'S Verfahren

der Einstellebenen E_1 und E_2 von einem festen Achsenpunkt gerechnet und sind e_1 und e_2 die Abstände der Durchstoßungspunkte eines zur Achse symmetrischen Bündelpaares, so ist

$$A = A_1 + \frac{e_1}{e_1 + e_2} (A_2 - A_1) \quad (88)$$

Schneiden die Bildstrahlen den Hauptstrahl nicht, wie insbesondere, wenn der Lichtpunkt außer der Achse liegt, so können nur die scheinlichen Abweichungen für passend gewählte Ebenen berechnet werden Die Aufnahmen gewinnen erheblich an Schärfe, wenn man einfarbiges Licht verwendet (Abb 113), wie es sich für genaue Messungen der sphärischen Abweichungen überhaupt empfiehlt HARTMANN untersuchte ferner die Strahlenvereinigung außer der Achse, ebenso KINGSTARK³, der auch die Ableitung der Aberrationskoeffizienten aus den Messungen behandelte

Bei dem HARTMANN'Schen Apparat (Abb 114) dient eine optische Bank LC von 1 m Länge zur Aufnahme der Träger M für das zur Prüfung benutzte Raster und R für das zu untersuchende Objektiv Dies wird, wie es bei den photographischen Kammern üblich ist, von einem Anschraub Brett getragen, das mit den Schrauben D befestigt und zentriert wird M wird nach Grobverschiebung und Klemmung mit Handgriff G fein verstellt, die Mikrometerschraube trägt Teilung für 0,001 mm Außerdem kann der Blendenträger E auf der Schiene Q

¹ Phys Z 29, S 66 (1928), SCHULZ, Ann d Phys 85, S 149 (1928)

² Z f Instrk 20, S 17 (1900), 24, S 1 (1904), Eders Jahrb 16, S 151 (1902), 17, S 665 (1903)

³ Proc Opt Convention 1926, S 839, Irans Opt Soc 27, S 221 (1925/6), SMITH, ebenda S 242

quer verschoben werden Q und LC tragen Teilungen für Ablesung auf 0,1 mm. Der Tisch H trägt die Lichtquelle. Das Beobachtungsfernrohr F kann innerhalb des Kreissektors B von 120° meßbar gegen LC verschwenkt werden. Es ist etwa 1 m lang und besitzt einen 40 cm langen Okularauszug, der mit

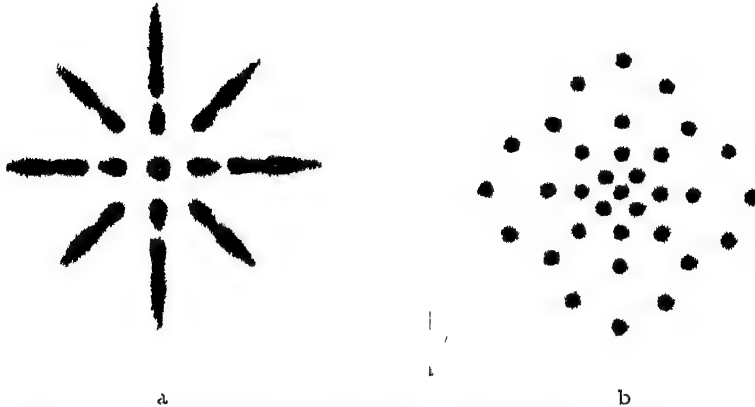


Abb 113 Aufnahmen nach HARTMANN'S Verfahren mit a) weißem und b) einfarbigem Licht

Spiegel S auf 0,1 mm abgelesen wird. An den Auszug kann mit Bajonettverschluß entweder ein Fadenmikrometer O , ein Rahmen zum Einschieben von Kassetten oder ein kleiner Spaltspektrograph mit 60° -Prisma angesetzt werden, und zwar in um 90° verdrehten Stellungen. Das Okular besitzt eine Drehscheibe mit Farbglasern, außerdem kann ein geradsichtiges Prisma

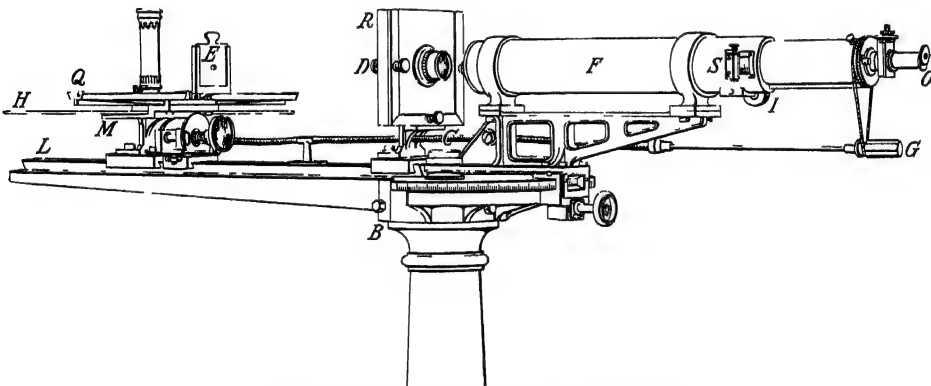


Abb 114 HARTMANN'S Prüfungsapparat

angesetzt werden. Die Prüfung des Systems durch extrafokale Aufnahmen kann auf drei Arten erfolgen. 1. Bei zur Seite geschlagenem Fernrohr wird mit entferntem Lichtpunkt gearbeitet, M nimmt die Kassette auf, bei verdunkeltem Zimmer genügt ein übergehangenes Tuch als Ersatz des Balges. 2. Das Fernrohr dient als Kollimator, indem in seine Kassette eine Metallplatte mit einer sehr feinen Öffnung eingelegt und beleuchtet wird. 3. Man bringt die Metallplatte auf M an und macht dann mit dem Fernrohr unter Benutzung des Mikrometers, des Spektrographen oder der Kamera die extrafokalen Messungen, als ob man

die Fehler des Fernrohrobjektivs bestimmen wollte. Nach FASSBENDER¹ ist das dritte Verfahren im Verhältnis der Brennweite des Fernrohrobjektivs zu der des Systems genauer als das zweite, das dafür eine geringere Beleuchtungsstärke verlangt, was bei Aufnahmen in Gelb oder Rot von Vorteil ist. Das Verfahren von HARTMANN wurde auch für die Untersuchung von Handfernrohren sowie von Parabolspiegeln nutzbar gemacht.² LEHMANN³ hat es zur optischen Verbesserung von Objektiven benutzt, er hat, wie auch EBERHARD⁴, ferner den Einfluß der Verkittung und der Fassung von Objektiven untersucht. CHALMERS⁵ und KOHLRAUSCH⁶ prüften photographische Objektive nach diesem Verfahren. MESLIN⁷ benutzte es zur Einstellung der Platte eines photographischen Fernrohrs. Andere Anordnungen verdankt man GRAF und LINNIK⁸, der auf der Platte die graphische Darstellung der sphärischen Abweichung erhält. TILLYER⁹ verlegt die Blende dicht hinter das Objektiv. Nach seinem Verfahren wurde von BENNETT¹⁰ eine größere Zahl photographischer Objektive verschiedener Bauart untersucht.

68 Das Doppelspaltverfahren Für die Genauigkeit des HARTMANNschen Verfahrens ist es ungünstig, daß bei kleiner Lochgröße, genauer bei kleinem

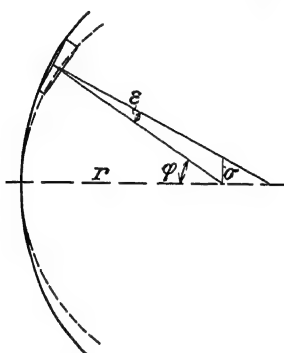


Abb 115 Zur Prüfung nach CHALMERS

Öffnungsverhältnis der durch sie bestimmten Teilbündel, das Beugungsbild immer verschwommener und größer wird und so die Genauigkeit der Fadeneinstellung abnimmt. HARTMANN gibt für die Genauigkeit dieser Einstellung 8μ an, andere $2,5\mu$. Diesem Nachteil sucht ein Verfahren abzuhelfen, das von CHALMERS¹¹ angegeben wurde und namentlich von VAISALA¹² seine Ausbildung und genaue theoretische Begründung erfahren hat. Im einfachsten Fall bringt man vor das Objektiv einen Schirm mit zwei Löchern in passendem Abstand. Das von einer einfarbigen Lichtquelle kleiner Winkelgröße ausgehende Licht liefert dann in der Biennebene ein Interferenzstreifenbild. Durch Messung der Lage des mittleren Streifens wird die Richtung der Sehne bestimmt, die in der Wellenfläche die den Loch-

mittlen entsprechenden Punkte verbindet, während bei dem Verfahren von HARTMANN Tangentialebenen der Wellenfläche bestimmt werden. Indem man das Lochpaar über einen Durchmesser der Öffnung wandern läßt, wird der entsprechende Schnitt der Wellenfläche bestimmt, mit Rücksicht auf vorhandenen Astigmatismus wird man mindestens zwei zueinander senkrechte Durchmesser untersuchen. Um die Helligkeit zu steigern, kann man die Löcher senkrecht zur Verbindungslinie langlich machen. Die Abweichung der Sehne wird zweckmäßig gegen eine von der Wellenfläche wenig abweichende Bezugskugel gemessen. Ist (Abb 115) die Neigung der Sehne gegen die Tangente der Bezugsk-

¹ Z f Instrk 33, S 177 (1913)

² MOURASHINSKY u SAVOSIMANOFF, Trans Opt Soc 30, S 49 (1928/9), ROMANOFF, Rev d'Opt 5, S 341 (1926)

³ Z f Instrk 22, S 103 (1902), 23, S 289 (1903) ⁴ Z f Instrk 23, S 274 (1903)

⁵ Phot J 29, S 143, Proc Opt Convention 1, S 24 (1905)

⁶ Phot Korr 57, S 45 (1920)

⁷ J de Phys 9, S 280 (1900), BAILLAUD, BA 1, S 213 (1920)

⁸ GRAF, Phys Z 25, S 489 (1924), LINNIK, Z f Phys 71, S 389 (1931)

⁹ J Wash Acad 3, S 481 (1913), TILLYER u SCHULTZ, Sc Pap Bur of Stand 14, S 341 (1918/9)

¹⁰ Sc Pap Bur of Stand 19, S 587 (1923/4)

¹¹ Proc Opt Convention 2, S 156 (1912), COTTON, Physica 1, S 274 (1921)

¹² Ann Univ Fenn Aboensis 1, Nr 2 (1922), 2, Nr 1 (1924)

kugel ε , der Halbmesser der Kugel r , der seitliche Abstand des mittleren Streifens von der Achse σ , die Neigung der Verbindungslinie von Kugel und Sehnenmitte gegen die Achse φ , so ist $\varepsilon = (\sigma \cos \varphi) r$. Entsprechend kann die Lage der Ebene durch drei Punkte der Wellenfläche mit Hilfe einer Blende gefunden werden, deren drei Locher nicht in einer Geraden angeordnet sind, sondern am besten ein gleichseitiges Dreieck bilden. Wendet man drei parallele

Spalte an, deren Mitten auf einer Geraden liegen, so kann man den Radius des Kreises bestimmen, der durch die den Lochern entsprechenden Punkte der Wellenfläche geht. Man hat beim Einschieben des Okulars die beiden zum



Abb 116 Die Anordnung von GARDNER und BENNETT

Krümmungsmittelpunkt symmetrischen Einstellebenen zu suchen, bei denen an Stelle des ersten dunklen Streifens ein mit dem mittleren gleich heller auftritt. Entsprechend kann man mit vier Lochern auch die Krümmung an einer Stelle der Wellenfläche messen. Was die Genauigkeit des ersten Verfahrens mit zwei Lochern betrifft, so ist sie umgekehrt proportional dem Abstand der Locher, bei einem Abstand von 13,2 mm und einer Brennweite von 750 mm betrug der mittlere Fehler der Fadeneinstellung etwa $0,4 \mu$. Es wurde in diesem Falle ein

künstlicher Stern benutzt, läßt sich das Fernrohr nur kurze Zeit unbeweglich halten, so kann man ein zweites von dem Interferenzbild unabhängiges Bild des Sterns zum Vergleich benutzen. MERLAND¹ mißt den Gangunterschied mit dem JAMIN'schen Komparator. Er photographiert nacheinander bei Verschiebung des Doppelspalts die einzelnen Stellen der Interferenzbilder, die zu einem Durchmesser gehören, nebeneinander auf die Platte MICHELSON² ordnet die eine Lochblende in der Achse fest an und verschiebt nur die andere. Dies Verfahren ist aber weniger günstig, bei großer Öffnung werden die Streifen zu



Abb 117 Das Interferenzbild beim Verfahren von GARDNER und BENNETT

eng. GARDNER und BENNETT³ suchen die Vorteile der Verfahren von HARTMANN und CHALMERS zu vereinigen. Sie setzen eine Loch- oder Schlitzblende D vor oder hinter (Abb 116) den Brennpunkt des Objektivs L und wählen den Loch- (Schlitz-) Abstand so, daß die Bildflecke auf der Platte P ineinandergreifen und Interferenzstreifen entstehen, auf die man genau einstellen kann (Abb 117). Ist der Gangunterschied der beiden Strahlen, d. h. der Unterschied der Wellen deformation an den den beiden Lochern entsprechenden Stellen, A , die Interferenzstreifenbreite b und v die Verschiebung des mittleren Streifens infolge des Gangunterschiedes, so gilt $A \lambda = v b$. Ist der Abstand der Schlitze e und die Breite der Schlitze B , so muß für n Interferenzstreifen $e = n B$ sein. Da die Helligkeit

¹ Rev d'Opt 3, S 401 (1924)² Ap J 47, S 283 (1918)³ J Opt Soc Amer 11, S 441 (1925)

der Beugungsscheibchen am Rande auf Null sinkt, wählt man n etwas höher als die gewünschte Streifenzahl, für die Streifen etwa gleich 5. Die Breite der Streifen auf der Platte ist $b = \lambda A e$, wo A der Abstand der Platte von der Blende mit den Schlitten ist.

In weiterer Verfolgung dieses Verfahrens gelangte BENNETT¹ zu folgender Anordnung. Statt der Lochblenden verwendet er ein Kreisgitter G und läßt die

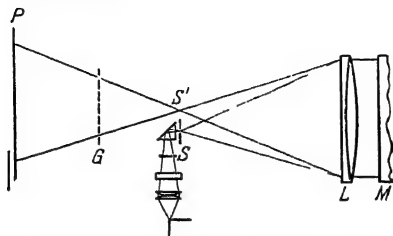


Abb 118 Die Anordnung von BENNETT

Strahlen erst hinter ihrem Vereinigungspunkt durch dieses hindurchtreten, wie es auch bei dem früheren Verfahren schon für den Fall der Autokollimation vorgeschlagen war, sowie für den von Linsen ganz kurzer Brennweite. Wie Abb 118 zeigt, wird der Krater einer Bogenlampe durch einen Kondensor mit Kuhltrag und monochromatischem WRATTEN-Filter 73 auf eine Blende S von 0,1 mm Durchmesser abgebildet, den künstlichen Stern. Das Objektiv L wird in Autokollimation mit dem Spiegel M geprüft, die Strahlen durchsetzen nach Vereinigung in S' das Kreisgitter G und liefern auf der Platte P ein aus Interferenzringen bestehendes Bild (Abb 119), die dort entstehen, wo die unscharfen

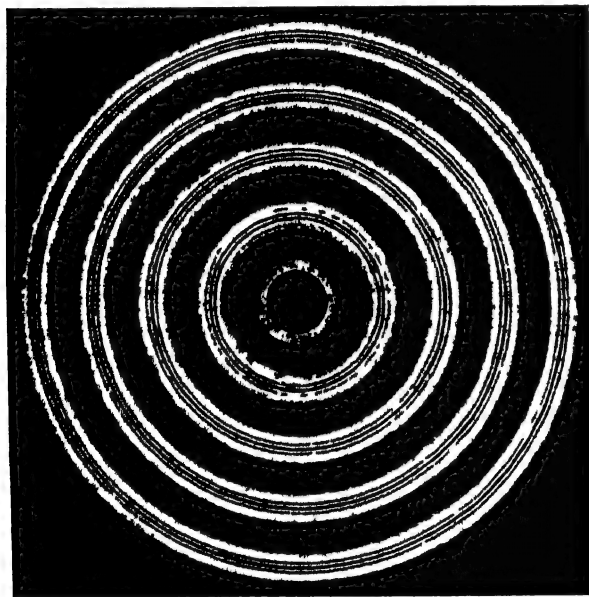


Abb 119 Das Interferenzbild beim Verfahren von BENNETT

Beugungsbilder des Kreisrings ineinandergreifen. Ein Gangunterschied für zwei entsprechende Stellen aufeinanderfolgender Kreisringe bewirkt eine Verschiebung der Interferenzstreifen. Der Gangunterschied in Wellenlängen wird durch das Verhältnis der Verschiebung zum Abstand aufeinanderfolgender Interferenzringe gegeben. Für die Wahl der richtigen Verhältnisse gibt BENNETT folgende Gleichungen, in denen O , die relative Öffnung ist, s die Ringschlitzbreite, e der Abstand zwischen den Mitten der aufeinanderfolgenden Ringschlitze, m die Zahl der Ringe, die bei der gegebenen Öffnung ausgenutzt wird, b der Halbmesser des auf

die photographische Platte projizierten ausgenutzten äußersten Rings, g der Abstand GS' , d der Abstand PG , w der Abstand aufeinanderfolgender Streifen, n die Anzahl der Streifen einer Interferenzgruppe (bei der gut sichtbaren Streifen wählt man $n = 5$)

$$b = 3mnw, \quad 1/P = w + 2O, m\lambda, \quad (89)$$

$$e = ns = 2PO, b\lambda, \quad d = 2PO, bw, \quad g = 4PO^2 m b \lambda \quad (90)$$

¹ Bur of Stand J of Research 2, S 685 (1929)

69 WETTHAUERS Verfahren Nach dem Vorgang von CLAUDET¹ benutzte PAUL² die Aufnahme einer schrag zur Achse stehenden Probetafel, dagegen KNIGHT³ die Aufnahme auf eine schrag zur Achse stehende Platte. Dies von KNIGHT angelegte Verfahren hat durch WEITHAUER⁴ eine vorzügliche Ausbildung erfahren, es gibt ein sehr anschauliches Bild der Fehler. Um die Abweichung in der Achse festzustellen, wird nach Abb 120 das Bild eines doppelten oder einfachen Spalts S_1 durch das Kollimatorobjektiv O_1 und das zu prüfende Objektiv O_2 im Brennpunkt S_2 von O_2 auf einer Platte Ph aufgenommen.

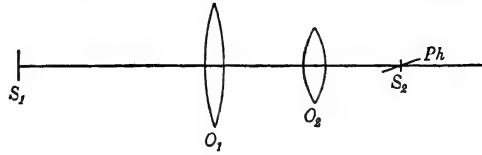


Abb 120 Die Anordnung für WETTHAUERS Verfahren

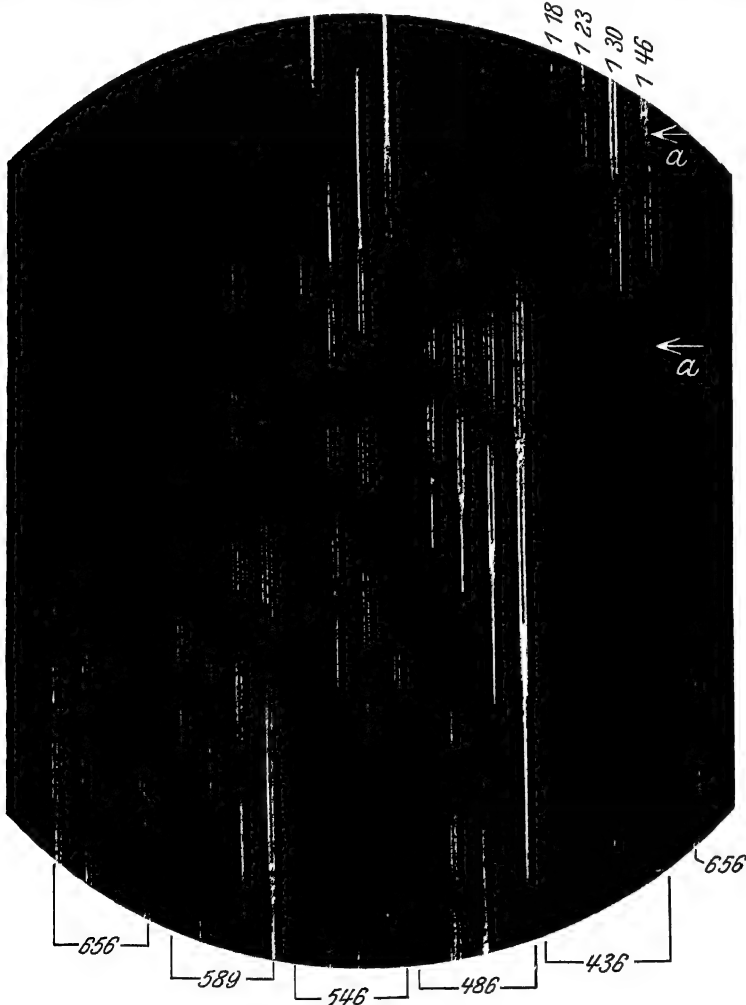


Abb 121 Eine Aufnahme der sphärischen und chromatischen Abweichung nach WETTHAUER

¹ PhilMag1, S 478 (1851) ² Phot J1, S 208 (1853/4) ³ CLAUDET, PhilMag 35, S 374 (1849)

⁴ Z f Instrk 41, S 148 (1921), 44, S 189 (1924), 51, S 393 u 553 (1931), HERRIOT, J Opt Soc Amer 23, S 123 (1933)

men, die zur Ebene durch Spalt und optische Achse senkrecht steht und gegen diese Achse schwach geneigt ist. Vor dem Objektiv werden Ringblenden angebracht, deren Breite etwa $1/100$ der Brennweite ist. Bequemer und auch für die Prüfung

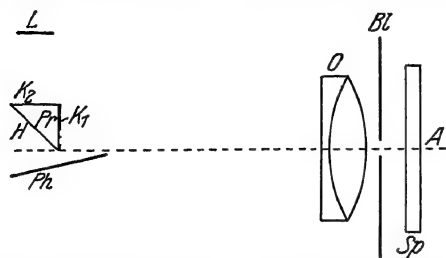


Abb 122 WETTHAUERS Autokollimationsverfahren

außer der Achse geeignet ist eine Lochzonenblende, diese besteht aus einer Platte, auf der in V-Anordnung eine Reihe Locher angebracht ist und die hinter einem über das ganze Objektiv reichenden Spalt verschoben wird, so daß nur je zwei symmetrisch zur Objektivmitte in einer zum Doppelspalt senkrechten Ebene liegende Öffnungen wirksam sind, deren Abstand von der Größe der Verschiebung abhängt. Die Platte wird beim Übergang von einer

Ringzone oder von einem Lochpaar zum andern oder auch von einer Farbe zum andern in ihrer Ebene senkrecht zur optischen Achse verschoben. Man erhält so eine Reihe Spaltbilder nebeneinander, die Stellen größter Scharfe verbindet

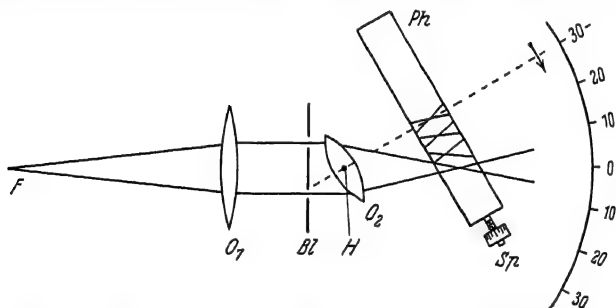


Abb 123 WETTHAUERS Anordnung für die Prüfung außer der Achse

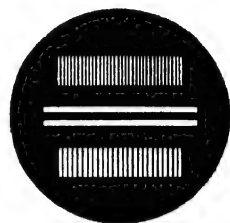


Abb 124 WETTHAUERS Doppelspalt mit Quagitter

eine Kurve, die unmittelbar die sphärische und chromatische Langsabweichung darstellt. Abb 121 stellt eine solche Aufnahme mit einem dreifachen Spalt dar. Bei der Ausmessung stellt man am besten auf die Enden aa der scharfen Stellen ein. Am besten beendet man die Aufnahme mit derselben größten Zonenblende

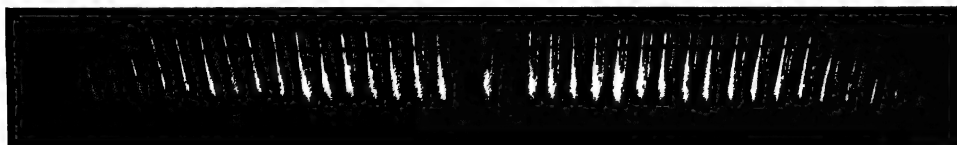


Abb 125 Eine Aufnahme der sagittalen und tangentialen Bildkrümmung nach WETTHAUER

und derselben Farbe, mit der sie begonnen wurde. Um die Fehler des Kollimators auszuschalten, kann man die in Abb 122 dargestellte Anordnung für Autokollimation benutzen. Die Genauigkeit beträgt bei einem Öffnungsverhältnis $1/15$ etwa $\pm 0,025$ mm und bei einem von $1/46$ etwa $\pm 0,14$ mm, für die Untersuchung außer der Achse wird das Objektiv mit der Platte um seinen hinteren Knoten- (Haupt-) Punkt gedreht (Abb 123). Wenn man die Aufnahmen bei

verschiedenen Drehungswinkeln nebeneinander macht, erhält man so die Kurve für die tangentielle Bildkrümmung. Um auch die für die sagittale Bildkrümmung zu erhalten, benutzt man neben dem Doppelspalt angeordnet ein Quergitter, wie es Abb 124 zeigt. In Abb 125 sind solche Aufnahmen wiedergegeben, außerdem die daraus abgenommenen Kurven für die sagittale (---) und tangentielle (— — —) Bildkrümmung. Bleibt bei dieser Versuchsanordnung der Drehwinkel ungeändert und werden die Lochzonenblenden benutzt, so erhält man die Darstellung der Koma, wie sie Abb 126 zeigt.

70 Das Messerschneidenverfahren Für die rasche Übersicht über die Fehler und daher zur Prüfung größerer Objektive und Parabolspiegel bei der Herstellung ist besonders das auf HUYGENS¹ zurückgehende Schneidenverfahren von FOUCAULT² beliebt. Er benutzte es zunächst bei der Herstellung von Kugel- und Parabolspiegeln (s. auch DRAPER³ u. a.), später aber auch bei der Herstellung von Objektiven, indem er diese mit Autokollimation an einem guten Planspiegel prüfte.

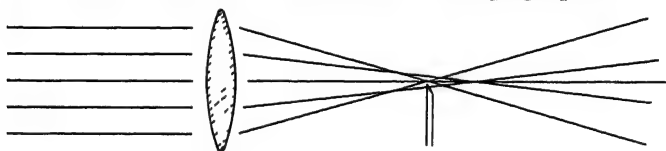


Abb 127 Zum Schneidenverfahren

Bei diesem Verfahren bringt man das Auge dicht hinter das Bild eines recht hellen Lichtpunktes von 0,05 bis 0,1 mm Durchmesser, der sich in der Nähe des Spiegelmittelpunktes bzw. Objektivbrennpunktes befindet, so daß die ganze Öffnung des Objektives hell erleuchtet erscheint. Wird nun eine Schneide in der Nähe des Bildpunktes quer zur Achse durch das Strahlenbündel bewegt (Abb 127), so sieht man ihren unscharfen Rand über die Öffnung wandern, wandert er im selben Sinne wie die Schneide, dann befindet sie sich innerhalb des Brennpunktes. Schiebt man die Schneide samt ihrem Schlitten vor und zurück, bis die Ebene ihrer Querbewegung durch den Lichtpunkt geht, so tritt die Verdunklung plötzlich ein. Vereinigen sich jedoch die Strahlen nicht zu einem Bildpunkt, so werden sie von den Schneiden früher oder später abgelassen, je nachdem, wo sie die Querebene durchstoßen. Sind die seitlichen Abweichungen nicht erheblich größer als der Lichtpunkt, so werden Halbschattenwirkungen auftreten, und man wird bei geeigneter Stellung der Schneide den Übergang von hell und dunkel auf der ganzen

Abb 126 Eine Aufnahme der Koma im Hauptschnitt nach WEINHÄUSER

¹ Opera archica, Amstelodami, 1, S 211 (1728) Übersetzt Centr Z f Opt u Mech 20, S 194 (1899)

² Ann Obs Paris 5, C R 47, S 958 (1858), M N 19, S 284 (1859), TAYLOR (COOKE and Sons), Z f Instrk 14, S 113 (1894)

³ Smiths Contr to Knowl 34, S 13 (1864), RITCHIE, ebenda 34, S 30 (1904), Ap J 19, S 53 (1904), DAVIES, M N 69, S 355 (1909)

Objektivfläche in den verschiedenen Stufen sehen. Die Öffnung erweckt die Tauschung eines Reliefs, das der Form entspricht, die die Wellenfläche zeigen



Abb 128 Bilder beim Schneidenvorgang für a) spherische Abweichung, b) Koma

wurde, wenn ihre Abweichungen stark übertrieben waren und die scheinbare Schattenwirkung auf ihr durch ein Licht hervorgerufen wurde, das sich auf der anderen Seite befindet, als von der die Schneide herangeschoben wurde. Nach Miss CONRADY¹ ist die Genauigkeit $\lambda/8$ Phasenunterschied (ähnlich RITCHIEY), sie gibt eine Reihe Bilder (Abb 128), die bei diesem Verfahren die verschiedenen Bildfehler kennzeichnen, der Pfeil gibt die Richtung an, in der die Schneide herangeschoben wird, die Bilder werden durch Abb 20c verstanden. Abb 129 zeigt den Anblick eines Objektivs bei diesem Verfahren nach einer Photographie von HARMANN², man erkennt darauf die epizykloidalen Polierzonen. Er war der erste, der das Verfahren zur Prüfung fertiger Refraktoren an einem Himmelsstern benutzte, wobei er wegen der Luftunruhe photographierte (s. auch PORRER³). RITCHIEY verwandte eine Schar von Sektorringblenden auf dem gleichen Durchmesser, WEIHAUER⁴ Ringblenden verschiedener Größe, die auf einer Drehscheibe auswechselbar angeordnet waren. Auf diese Weise konnte durch Verschiebung der Schneide in der Achse die spherische Abweichung gemessen werden. COJAN⁵ erkannte, daß die Beurteilung der gleichen Helligkeit in symmetrischen Blenden darunter leidet, daß die zu vergleichenden Felder großen Abstand haben. Er machte daher photographische Aufnahmen für Stellungen der Schneide in verschiedenem Abstand vom Spiegel und untersuchte durch photometrische Ausmessung, wo die gegenüberliegenden Stellen gleich hell erschienen. Er wandte dies Verfahren auch auf sagittale Buschel an. Mit der Theorie des Schneidenvorgangs auf Grund der Beugungslehre beschäftigen sich RAYLEIGH⁶ und BANFRIJ⁷.

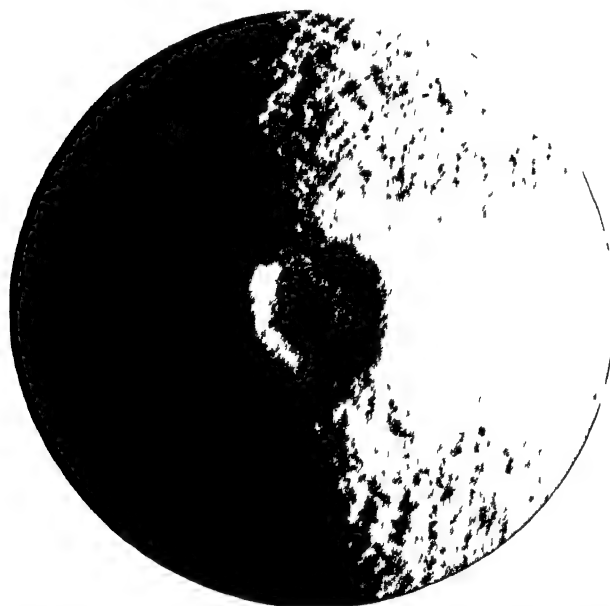


Abb 129 Der Anblick eines Objektivs bei der Schneidprobe

Man kann das Schneidenvorgang auch gewissermaßen umkehren, indem man das Bild des leuchtenden Punktes nicht durch einen Schirm abbildet,

¹ Trans Opt Soc 25, S 219 (1923/4)

² Berl Ak Ber 1907, S 935

³ Ap J 47, S 324 (1918)

⁴ Z f Instrk 41, S 184 (1921)

⁵ C R 179, S 893 (1924), 180, S 1016 (1925)

⁶ Phil Mag 33, S 161 (1917)

⁷ Ap J 48, S 50 (1918)

sondern durch eine feine Öffnung auffängt und herausblendet. Man sieht dann in der Öffnung des Systems diejenigen Stellen leuchten, die zu dem aufgefangenen Bilde beitragen, die anderen sind dunkel. Das Verfahren wurde von STRAUBEL¹ für kleine Linsensysteme empfohlen, er benutzte eine linienförmige Lichtquelle und einen Spalt. Das Verfahren besitzt vor dem anderen den Vorzug der Symmetrie, es liefert aber aus diesem Grunde nicht den Anschein des Reliefs.

71 Die Verfahren von YVON und STREHL. Ein auf FOUCAULT zurückgehendes Verfahren ist von YVON² als das der Grenzhalschatten ausgebildet worden. Er bestimmt die Krümmungsradien der Wellenfläche an den verschiedenen Stellen, indem er die Langverschiebung der Schneide bestimmt, die für die betreffende Stelle des Spiegels oder Objektivs einen gleichmäßigen, nicht einseitig abfallenden Halbschatten gibt. Hierher gehört auch das Verfahren von STREHL³, der den Astigmatismus der Teilbündel mißt und daraus wie in Ziff. 4 auf die sphärische Abweichung umrechnet.

72 Die technische Konstante des Objektivs. Es ist nun noch die Frage, wie aus der festgestellten sphärischen Abweichung eines Objektivs ein Maßstab für die Güte des Objektivs gewonnen wird. LEHMANN⁴ zerlegt das Objektiv in Zonen gleicher Breite und bildet das Mittel aus den ihnen entsprechenden Zerstreuungskreishalbmessern, indem er jedem das Gewicht entsprechend der Fläche der betreffenden Ringzone des Objektivs beilegt. Indem er noch durch die Brennweite f dividiert, setzt er seine technische Konstante T des Objektivs fest. Ist r der Halbmesser der Zone, Δs ihre sphärische Langsabweichung, also (r/f) Δs die Seitenabweichung, so ist

$$T = \frac{200\,000}{f^3} \frac{\sum r^2 \Delta s}{\sum r} \quad (91)$$

Am natürlichsten erscheint es, die Abweichungen der Schnittweiten gegen einen solchen Achsenpunkt zu rechnen, daß T den kleinsten Wert annimmt. VAISALA⁵ schlägt vor, nach folgenden Formeln zu rechnen, wo $\varrho = r/R$ und R der Halbmesser der Öffnung ist:

$$\Delta s_0 = 3 \int_0^1 \varrho^2 \Delta s d\varrho, \quad (92)$$

$$T' = 400\,000 \int_0^1 \varrho^2 (\Delta s - \Delta s_0) d\varrho \quad (93)$$

Beim Vergleich eines Objektivs von großem Öffnungsverhältnis mit einem solchen von kleinerem ist von dem ersten kleinere Seitenabweichung in der Brennebene zu fordern, entsprechend dem kleineren Beugungsscheibchen⁶.

DEMBRESCU⁷ teilt die Objektivöffnung in m gleiche Flächenelemente, jedem Flächenelement entspricht ein Strahl, der einen Durchstoßungspunkt in einer achsensenkrechten Ebene in der Nähe des Brennpunktes bestimmt. Indem jedem Durchstoßungspunkt die Masse 1 beigelegt wird, wird die Lichtverdichtung durch das Tragheitsmoment S , bezogen auf den Schwerpunkt, gemessen. Den Querschnitt, für den dieses Tragheitsmoment am kleinsten ist, nennt er den Querschnitt der größten Lichtverdichtung. Eine gleichmäßig beleuchtete Kreisscheibe, die die gleiche Masse und das gleiche Tragheitsmoment S_1 wie dieser Querschnitt hat, hat den Radius $\sigma_1 = \sqrt{2S_1/m}$. Diesen Radius, bezogen auf die einer ding-

¹ Ber d. internat. seism. Konf. Leipzig, Engelmann 1902.

² MARTIN, C. R. 70, S. 389 (1870), YVON, Rev. d'Opt. 4, S. 8 (1925).

³ Z. f. Instrk. 23, S. 6 (1903).

⁴ Z. f. Instrk. 22, S. 327 (1902).

⁵ Ann. Univ. Fenn. Aboensis 1, Nr. 2 (1922).

⁶ YVON, Rev. d'Opt. 4, S. 593 (1925). ⁷ B. A. 1, S. 15 (1920), Rev. d'Opt. 5, S. 193 (1926).

seitigen Winkelsekunde entsprechende Stiecke in der Brennebene, nennt er das geometrische Trennungsvermogen σ'_1 und nennt $s = D\sigma'_1$, wo D der Objektdurchmesser ist, den Trennungskoeffizienten, der ihm als Maß der Gute des Objektivs dient, wenn man Objektive verschiedener Größe vergleichen will. Er gibt ferner ziemlich verwickelte Formeln für den von ihm eingeführten globalen Astigmatismus, dem für die ganze Objektöffnung gultigen, im Gegensatz zu dem sonst nur für kleine Objektöffnung gultigen Astigmatismus.

Auch WILSING¹ bemerkte, daß die Prüfung der Objektive durch die Untersuchung des Auflösungsvermögens und die Betrachtung der Beugungsfiguren in der Nahe der Brennebene für eine Bestimmung der Nutzleistung des Objektivs nicht ausreicht. Er bestimmte die Abweichungen der Wellenfläche, um aus ihnen die Nutzleistung durch Rechnung zu finden, und führte dies bei dem Potsdamer Refraktor durch. SIEGHEIL (Ziff 30) sieht als Maßstab für die Gute des Objektivs das Verhältnis Z zwischen der Beleuchtungsstärke im Achsenpunkt des Beugungsscheibchens des wirklichen und der im Achsenpunkt des fehlerfreien Objektivs an, die Einstellenebene ist so zu bestimmen, daß die Beleuchtungsstärke möglichst groß ist. Für den Fall, daß die Abweichungen der Wellenfläche nur klein sind, findet VAISALA², daß

$$Z = 1 - \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \varepsilon^2, \quad (94)$$

wo ε die mittlere Abweichung der Wellenfläche ist, die Gestalt der Wellenfläche ist also nebensächlich. VAISALA gibt auch für den anderen Fall Rechenvorschriften. Für die Objektive der astronomischen Fernrohre diente Z der geeignete Maßstab der Gute sein, während man beim photographischen Objektiv, wo größere Abweichungen zugelassen werden, sich mit der Konstanten I begnügen kann. Um Objektive von verschiedenem Durchmesser hinsichtlich ihrer Leistung zu vergleichen, führt VAISALA den effektiven Durchmesser des Objektivs $D\sqrt{Z}$ ein. Es mögen noch für einige größere Objektive die Werte von ε , Z , $D\sqrt{Z}$ und I gegeben werden.

	Durchm. cm	ε μ	Z	$D\sqrt{Z}$ cm	I
Yerkes	102	56	0,68	83,7	0,16
Potsdam	80	47	0,63	63,5	0,31
Pulkowa	76	25	0,92	73	0,18
Wien	68,5	50	0,73	57,7	0,16
Beim-Babelsberg	65	37	0,84	59,6	0,22

73 Andere Bildfehler für eine Farbe. Die Prüfung auf Erfüllung der Sinusbedingung ist mit den beschriebenen Verfahren, soweit mit ihnen die Richtung der austretenden Strahlen genau genug bestimmt werden kann, ohne weiteres möglich. Es sei noch auf FASSBENDER³ verwiesen, der mit dem ABBS'schen Fokometer (S 208) arbeitet, und auf BENNETT, der das Verfahren von HARMANN benutzt. Sollen Bildwölbung und Astigmatismus gemessen werden, so wird bei dem HARMANN'schen Apparat (Ziff 67) das Fernrohr nach Einstellung auf ∞ von 5° zu 5° verschwenkt und der Rasterträger auf der Querschiene entsprechend verschoben, jedesmal wird mit G auf horizontale und vertikale Striche eingestellt und an der Mikrometerschraube die Änderung der Einstellung abgelesen.

Die naheliegende Prüfung auf Verzeichnung besteht darin, daß man zu bekannten abgestuften Dinggrößen die zugehörigen Bildgrößen ausmißt. Für die Messung der Verzeichnung kleinerer Objektive ist der Knotenpunktschlitten⁴

¹ Publ. Potsdam 15, Nr 48 (1903)

² Ann. Univ. Fenn. Aboensis 2, S. 1 (1924)

³ Z. f. Instr. 33, S. 210 (1913)

⁴ BENNETT, J. Opt. Soc. Amer. 16, S. 147 u. 235 (1927)

(Ziff 61) und der Apparat von HARTMANN (Ziff 67) geeignet. Bei mäßigen Verzeichnungsfehlern kann es ebenso bequem sein, auf der Dingseite bei umgekehrtem Strahlengang zu messen, indem man bei einem Fernrohrobjektiv etwa auf der Dingseite ein Spektrometer benutzt. Man kann die Verzeichnung auch bestimmen, indem man ermittelt, wieviel das Bild einer Dinggeraden außer der Achse auf eine bestimmte Strecke durchgebogen erscheint¹. Beim montierten großen Objektiv ist folgendes Verfahren zweckmäßig². Zwei Sterne gleicher Deklination, deren Abstand etwa gleich dem halben Plattendurchmesser ist, werden dreimal auf dieselbe Platte um ihren Abstand verschoben aufgenommen. Man kann auch im Laboratorium mit Planspiegel in Autokollimation prüfen, wenn man das Bild des Mittelstücks eines Gesichtsfelddurchmessers durch Neigen des Spiegels in seiner Richtung verschiebt und die Längenänderung mißt, oder senkrecht zu seiner Richtung verschiebt und die Durchbiegung mißt. Allgemein ist zu bemerken, daß man mit zur optischen Achse senkrechtem Spiegel nur die sphärische und chromatische Abweichung in der Achse sowie Bildkrümmung und Astigmatismus untersuchen kann und diese im doppelten Betrage mißt, Koma und Verzeichnung müssen dagegen mit in der Achse angeordnetem Objekt und Objektiv bei zur optischen Achse verschwenktem Spiegel untersucht werden. Bei dieser Prüfung der Bildfehler außer der Achse in Autokollimation darf der Hauptstrahlengang nicht zu abweichend von dem bei der Benutzung sein.

74 Die Farbenabweichung Für die Messung der Farbenabweichung ist von RUTHERFORD³ und VOGEL⁴ ein einfaches Verfahren angegeben worden. Man bringt hinter das Fernrohrokular einen geradsichtigen Prismensatz und zieht so das Sternbild in ein Spektrum auseinander. An der Stelle derjenigen Farben, auf deren Bild das Okular eingestellt ist, zeigen sich Einschnürungen, die mit der Verschiebung des Okulars in der Achse wandern, so kann die Längenabweichung für Farben gemessen werden (Abb 130). Bei schwächeren Okularen



Abb 130 Die Farbenprobe nach RUTHERFORD

kommt es darauf an, die Farbenabweichung des Auges auszuschalten, indem man sie besonders bestimmt. Am einfachsten geschieht dies bei Autokollimation, indem man die Farbenabweichung nicht nur für den Bildpunkt, sondern auch für den Lichtpunkt selbst bestimmt. YOUNG⁵ verfährt ähnlich, nur stellt er auf die Bilder von Staubteilchen im Spalt scharf ein. Auch HARTMANN maß, ohne zu photographieren, bei seinem Verfahren die Farbenfehler mit Dispersionsprisma hinter dem Okular. Bei allen Verfahren zur Messung der sphärischen Abweichung kann die Farbenabweichung dadurch gefunden werden, daß man die Messungen für verschiedenfarbiges Licht ausführt, sei es nun das durch Farbfilter geseiebte Licht der Quecksilberlampe, die Na- und Cd-Gaslampe nach PIRANI, der Lichtbogen von mit Metallsalzen getränkten Kohlen oder die Funkenspektren von Metallen. Im allgemeinen ist das spektral zerlegte Licht einer Bogenlampe am besten. MARTIN und KINGS LAKE⁶ benutzten beim Interferometer von TWYMAN die Verschiebung des Hohlspiegels zur Messung der Farbenabweichung.

¹ PAUL, Rev d'Opt 5, S 328 (1926)

² ARTHUR KONIG u HECKMANN, V J S 63, S 279 (1928)

³ Amer J of Science 35, S 71 (1863)

⁴ Berl Mon-Ber 1880, S 433, A N 119, S 293 (1888), WOLFF, Wied Ann 33, S 212 (1888), A N 120, S 74 (1889)

⁵ Amer J of Science 19, S 454 (1880)

⁶ Trans Opt Soc 25, S 213 (1923/4)

Wegen der Unbequemlichkeit der großen Entfernung des Spektralapparates bringt HARMANN¹ ein Objektivprisma vor die Blendscheibe, während EBERHARD² einen Kollimator verwendet, dessen Objektivbrennweite so viel größer als die des Systems ist, daß seine Farbenabweichung, die nur im quadratischen Verhältnis der Brennweiten wirkt, vernachlässigt werden kann oder nur eine kleine Verbesserung bedingt, das System dient dabei als Kameraobjektiv des Spektrographen. Bei großen Objektiven zerlegt HARMANN die extrafokalen Bilder, und zwar gleichzeitig die Paare von zwei Zonen mit dem Spektrographen für die photographische Aufnahme (Abb 131). Die Öffnungen der Blende liegen auf einem dem Spalt parallelen Durchmesser. HERZSPRUNG³ nimmt an, daß die normale Einstellung dem Umkehrpunkt der Kurve des sekundären Spektrums entspricht. Auf einer extrafokalen Aufnahme, bei der ein Gitter vor das Objektiv gesetzt ist, erscheinen in den Spektren einer Ordnung Knoten für die Wellenlängen, die in der Aufnahmeebene eingestellt sind und die aus dem Knoten-

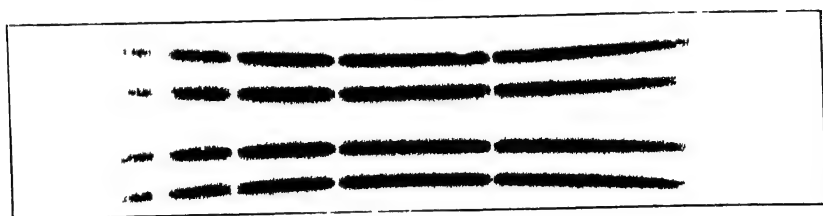


Abb 131 Eine Aufnahme mit dem Spektrographen nach HARMANN'S Verfahren

abstand berechnet werden können. Dann berechnet er die Konstanten der HARMANN'Schen Formel für das sekundäre Spektrum. Statt der Einstellung im den Umkehrpunkt kann man auch eine zweite extrafokale Aufnahme machen, wobei man von der Annahme über die Einstellenebene frei ist.

75 Das photographische Objektiv Betreffend die in der Praxis übliche Prüfung der photographischen Objektive, insbesondere durch Aufnahmen einer großen Probetafel, sei auf die Quellen verwiesen⁴. Die Apparate sind meist mit einer Einrichtung zur Messung der Brennweite verbunden.

76 Der Spiegel Ein besonderes Eingehen verlangt noch die Prüfung von Spiegeln. Kugelhohlspiegel prüft man auf sphärische Abweichung, indem man den Dingpunkt in den Kugelmittelpunkt bringt. Um Parabelspiegel herzustellen, prüfte FOUCAULT⁵ mit seinen Verfahren, indem er vom Kugelspiegel ausgehend die Form allmählich änderte und die Lichtquelle in den verschiedenen Stufen der Arbeit immer weiter wegrückte. Man prüft auch wohl fortgesetzt im Mittelpunkt der Scheitelskugel, bis die gerechnete Abweichung der Flächennormalen erreicht ist, oder hebt sie bei der Prüfung durch ein Zusatzlinsensystem auf⁶. Hat man einen guten Planspiegel von genügender Größe zur Verfügung, so kann man in Autokollimation prüfen. FOUCAULT⁷ brachte zu dem Zweck in der Mitte des Planspiegels ein Loch an, statt dessen kann man auch einen kleinen schrägen

¹ Z f Instrk 24, S 8 (1904)

² Z f Instrk 23, S 82 (1903)

³ A N 207, S 87 (1918)

⁴ DARWIN, Proc R Soc 52, S 403 (1892), BLACK, Eders Jahrb 17, S 257 (1905), ZSCHOKKE, ebenda 20, S 71 (1906), Z f Reprod-technik 7, S 43 (1905), JFWILL, J Opt Soc Amer 2 3, S 51 (1919)

⁵ C R 47, S 205 (1858), DAVILS, M N 69, S 355 (1909)

⁶ COUDER, Rev d'Opt 6, S 49 (1927)

⁷ MARTIN, C R 70, S 446 (1870), RICHFY Ap J 19, S 59 (1901)

Fangspiegel benutzen SAMPSON¹ stellte den künstlichen Stein (Bild einer Punktlichtlampe von einer Stahlkugel) im Abstand $1,5 F$ vom Spiegel auf

Bei dem Verfahren von OFERTLING² wird eine Planfläche dadurch untersucht, daß man ein Parallelstrahlenbündel unter großem Einfallswinkel an ihr reflektieren läßt und etwa auftretenden Astigmatismus bei starkerer Fernrohrvergrößerung mißt

Hat man nach dem Schneidverfahren einen guten Kugelspiegel hergestellt, so kann man ihn nach COMMON³ zur Prüfung bei der Herstellung eines größeren Planspiegels benutzen (Abb 132), indem man den Planspiegel neben dem Kugelspiegel so aufstellt, daß die von dem Lichtpunkt O ausgehenden Strahlen nach Durchgang durch ein halbdurchlässiges Prisma W unter größerem Einfallswinkel ($90 - \alpha$) auf den Planspiegel P und dann wie sonst auf den Kugelspiegel S mit dem Mittelpunkt M treffen, so daß beim Rückgang über den Planspiegel das Bild wieder nahe am Lichtpunkt in O' entsteht wo es durch das Okular Ok betrachtet werden kann, die Empfindlichkeit des Schneidverfahrens ist so erhöht, da das OERTLINGsche Verfahren mit verwandt wird Über andere Anordnungen siehe VAISALA⁴ Mit dem Kugelspiegel als Hauptspiegel prüft HINDLE⁵ den Fangspiegel des Cassegrain oder Gregory, indem er den Fangspiegel um die Brennweite des Hauptspiegels von diesem wegrückt, so daß bei Autokollimation die Strahlen am Hauptspiegel in sich zurückreflektiert werden

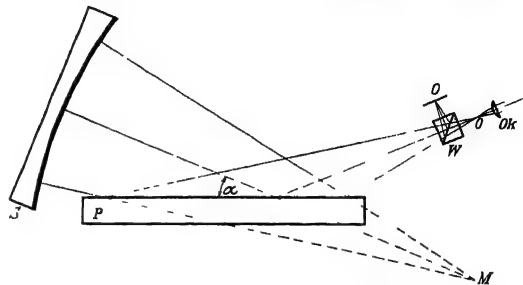


Abb 132 Die Prüfung einer Planfläche mit Kugelspiegel

Die optische Technik verwendet, um eine vorgeschriebene Krümmung stets in gleicher Genauigkeit herzustellen, das von FRAUNHOFER erfundene Probeglasverfahren Man legt auf die zu untersuchende ebene oder vertiefte Fläche nach sorgfältiger Reinigung ein vertieftes oder ebenedes Probeglas von entgegengesetzter gleicher Krümmung, wobei die Seite des Probeglasses der zu prüfenden Fläche zugewandt ist, die die vorgeschriebene Krümmung besitzt Die zwischen den beiden einander sehr benachbarten Flächen entstehenden NEWTONschen Ringe lassen die Gleichheit der Krümmungen beurteilen

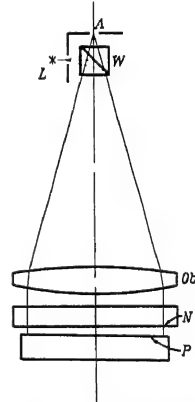


Abb 133 Die Prüfung einer Planfläche nach FLEU

In dieser Weise prüft man nach FIZEAU⁶ auch Planflächen Zu unabhängigen Prüfung braucht man drei Planplatten, bei allen drei Kombinationen verschwinden die Ringe nur dann, wenn keine Platte gekrümmt ist Für genaue Beobachtung mit einfarbigem Licht⁷ eignet sich das Gerät nach Abb 133 Von einer

¹ M N 91, S 862 (1931)

² Vch d Vcr z Bcl d Gewerbefl 22 S 60 (1843), Pogg Ann 59, S 284 (1843) L'OUCAULI, C R 69, S 1101 (1869) PLANCH, Centi / Opt u Mech 3, S 265 (1882)

³ M N 48, S 105 (1887)

⁴ Ann Univ Penn Abensis 2, S 1 (1924)

⁵ Obs 54, S 100 u 186 (1931) M N 91, S 592 (1931)

⁶ Ann de Chim et Phys 8 S 335 (1866)

⁷ CZAPSKI, Z f Instik 6, S 293 (1886), MABBOU, Rev d'Opt 6, S 470 (1927) ARNUIR, ebenda 9, S 177 (1930), La mesure des rayons de courbure Paris Verlag d Rev d'Opt 1930

kleinen Lichtquelle L wird das Licht durch den Würfel mit halbdurchlässiger Silberschicht und die Linse Ob parallel auf die Probeplatte N und die Planplatte P gelenkt. Die zurückgeworfenen Strahlen geben für das Auge Interferenzstreifen, die die Kurven gleicher Dicke der Luftschicht zwischen den Platten darstellen. Größere Genauigkeit gibt das Verfahren von LUMMER¹ mit den HÄIDINGERSchen

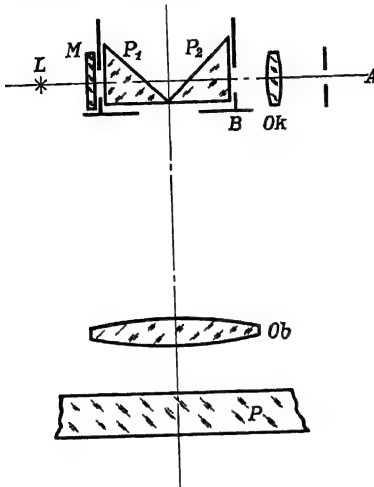


Abb 134 Die Prüfung einer Planfläche nach LUMMER

Interferenzstreifen, Abb 134 zeigt die Anordnung für die Prüfung einer Planplatte auf konstante Dicke, ebenso läßt sich bei Prüfung einer Planfläche die Konstanz der Dicke der Luftschicht zwischen N und P in Abb 133 untersuchen. Die Lichtquelle beleuchtet hier eine Mattscheibe M , das Prisma P_1 und die Linse Ob lenken das Licht auf die Planplatte. Das Licht, das von den beiden Flächen zurückgeworfen wird und weiter die Linse Ob und das Prisma P_2 durchsetzt, liefert in der Blende B ein System von Interferenzringen, das mit dem Okular Ok durch das Auge bei A beobachtet wird, die Blenden bei M und B befinden sich im Brennpunkt von Ob . Jedem Punkt des Interferenzbildes entsprechen so Strahlen gleicher Neigung in der Glasplatte. Man prüft nun, indem man die Platte in ihrer Ebene verschiebt, bei jeder Dickenänderung um $\lambda/4$ (im Glas gerechnet) wird die Mitte

abwechselnd hell und dunkel. Bei wachsender Dicke quellen die Interferenzringe aus ihrem Mittelpunkt hervor, bei abnehmender versinken sie dort. Apparate für diesen Zweck wurden verschiedentlich angegeben, andere benutzen den RAYLEIGH'schen oder den FABRY-PEROTSchen Interferenzapparat² oder ähnlich wie beim MICHELSON'schen Sterninterferometer die Sichtbarkeit der Interferenzstreifen³, auch das Interferometer von TWYMAN (Ziff 63) ist gut geeignet.

77 Die Bestimmung des Brennpunkts Die Lage des Brennpunkts eines Objektivs wird bei der Prüfung auf sphärische Abweichung mit gefunden, wo es angeht, mit Kollimator als Ersatz des entfernten Ziels. Hierfür eignen sich besonders die Verfahren von HARIMANN, WEIßHAUPT (die Platte kann hierbei durch eine Mattscheibe ersetzt werden), PAUL (Ziff 69) und das Schneidverfahren von FOUCAULT, bei diesem dient am besten als Schneide die scharfe Kante des Prismas, das auf der Kathetenseite mit dieser Kante einen Belag trägt, in dem eine kleine Öffnung als Lichtpunkt ausgespart ist. Für geringere Genauigkeit stellt man einfach die Lage eines Fadenkreuzes fest, das bei Benutzung eines starken Okulars gleichzeitig mit dem Bild scharf erscheint oder das keine Parallaxe gegen das Bild zeigt. RAYLEIGH fand für die Genauigkeit der Schärfstellung seine Formel (Ziff 26) bestätigt. Andere⁴ fanden mehrmals höhere Genauigkeit, sie hängt von der Art des Fadenkreuzes und der Güte des Objektivs ab. Am genauesten wird die Einstellung auf Parallaxe, wenn man den Bildpunkt

¹ Wied Ann 23, S 49 (1884), CZAPSKI, Z f Instr 6, S 293 (1886), Phys-techn Reichsanstalt, ebenda 41, S 106 (1921), BRODHUN u SCHONKOLK, ebenda 22, S 353 (1902), SCHULTZ, ebenda 32, S 258 (1912), SCHULTZ, ebenda 34, S 252 (1911).

² BERKELEY u THOMAS, Phil Mag 29, S 613 (1915), DUFFELUX, Rev d'Opt 11, S 159 (1932).

³ MÜNSTER, Phys Z 33, S 505 (1932).

⁴ FABRY, J de Phys 8, S 11 (1919), ARNUTT, VAN HILL u PIERCE, C R 187, S 1044 (1928), 188, S 860 (1929).

oder die Bildlinie zwischen die Faden eines Okularschraubenmikrometers einstellt, und bei abwechselnder Abblendung der Hälfte des Objektivs, wobei die Halbierungslinie parallel dem Faden ist, das Mikrometer so lange in der Achse verschiebt, bis die Ablesung von der Blendenlage unabhängig ist. Autokollimation ist hier bequem, die auch DEVE (S 210) und LIPPMANN¹ etwas abgeändert benutzen. Bei diesem fällt das Licht in Richtung der optischen Achse ein und durchsetzt einen feinen geraden Riß in einem Silberbelag eines um 45° geneigten Spiegels, das zurückgehende Licht wird von dem Spiegel quer zur Achse in das Okular zurückgeworfen. Man beobachtet nun, ob das Spaltbild genau in den Spalt selbst paßt. Dies erkennt man sehr scharf, da bei richtiger Einstellung im dunklen Gesichtsfeld nur die Kanten des Spalts infolge der Farbenabweichung des Objektivs mit schwachen Farbensäumen aufleuchten. Andere Verfahren beruhen darauf, daß die Querverschiebung eines einfallenden Parallelstrahlenbündels von geringerer Breite als das Objektiv keine solche des Bildpunkts hervorruft².

Ist der Dingpunkt nicht so weit entfernt, um als unendlich angesehen zu werden, so genügt bei größerer Entfernung eine rohe Kenntnis der Lage des vorderen Brennpunkts und der Brennweite, um die Verschiebung des Bildpunkts in der Achse gegen den Brennpunkt berechnen zu können, so daß man an Stelle des Brennpunkts die Lage dieses Bildpunkts aufsuchen kann. Ist der Brennpunkt einer Zerstreuungslinse P oder ein anderer virtueller Brennpunkt zu bestimmen, so stellt man mit einem Fernrohr durch P hindurch auf einen unendlich feinen Bildpunkt ein. Wenn der Auszug nicht genügt, muß man ein genügend starkes sammelndes System vor das Fernrohr schalten, dann bringt man P aus dem Strahlengang und sucht den Ort einer Marke, die unmittelbar scharf erscheint (& auch die Verfahren von ANDERSON und TOMKINS³). Endlich sei noch das Verfahren von SCHUSLER⁴ zur Einstellung des Kollimators eines Spektralapparats erwähnt. Es beruht darauf, daß $dv' dv$, also auch $du' du$ fortwährend mit dem Einfallswinkel v abnimmt. Man wählt nun zwei Stellungen A und B des Prismas symmetrisch zum Minimum der Ablenkung, v sei für A am größten. Dann stellt man in Stellung A das Fernrohr auf das Zielbild ein, in Stellung B macht man es wieder scharf durch Verstellung des Kollimators und wiederholt dies, bis eine Neueinstellung unnötig wird.

78 Die Messung der Brennweite Wenn der Einfluß der Aberrationen auf die Messung der Brennweite genügend genau bekannt ist, ist die erste Bedingung für eine genaue Messung dieser Größe erfüllt. Da die Bedeutung dieser Größe nur für die GAUSSISCHE Abbildung, die des achsennahen Raums, festgelegt ist, die Messung selbst aber nur bei endlicher Öffnung und endlicher Hauptstrahlenneigung möglich ist, muß ein etwa vorhandener Einfluß der Abbildungsfehler berücksichtigt werden. Dies kann auch dadurch geschehen, daß die Messung für abgestufte Strahlenneigungen durchgeführt und der Grenzwert für kleine Neigung extrapoliert wird. Da bei kleiner Ungenauigkeit der Form der brechenden bzw. spiegelnden Flächen dieser Grenzübergang unsicher ist, kann man nicht erwarten, daß die verschiedenen Verfahren zur Messung der Brennweite zu genau dem gleichen Ergebnis führen. Nun kommt es ja auch meist nicht auf die Brennweite für den achsennahen Raum an, sondern man will nur die Brennweite benutzen, um die Bildgröße zu einem Ding von bestimmter Größe und bestimmtem Abstand zu berechnen. Eine besonders genaue Messung der

¹ C R 158, S 88 J de Phys 4, S 97 (1914)

² KERBLER, D R P 11 521 (1880), LIPPMANN, C R 129, S 569 (1899), 134, S 16 (1902), J de Phys 1, S 625 (1902) Phys-techn Reichsanstalt, Z f Instrk 40, S 96 (1920)

³ ANDERSON, Phil Mag 11 S 789 (1906), TOMKINS, ebenda 15, S 198 (1908)

⁴ Phil Mag 7, S 95 (1879)

Brennweite wird also zweckmäßig bei einem Strahlengang vorgenommen, der sich dem anschließt, für den die Bestimmung der Brennweite gebraucht wird. Daneben ist auch darauf Rücksicht zu nehmen, daß die Bildfehler bei dem benutzten Strahlengang klein sind. Handelt es sich um die Bestimmung der Umrechnungszahl für mikrometrische Messungen in der Brennebene eines Objektivs, so ist diese Zahl nur dann die Brennweite, wenn die Meßfaden sich wirklich in der hinteren Brennebene befinden. Es kommt hier auf die Bildgröße in der Fadenebene an, die man aus dem Bild in der Brennebene erhält, wenn man es aus der Austrittspupille, d. h. mit Hauptstrahlen, in die Fadenebene projiziert. Beim einfachen zweilinsigen Objektiv kann man die Austrittspupille im hinteren Hauptpunkt annehmen.

Für die Messung der Brennweite kann man sich sowohl der Bestimmung der Lage zugeordneter Achsenpunkte bedienen wie der Winkelvergrößerung und der Quervergrößerung für bestimmte Punkte. Zur Vereinfachung des Verfahrens wählt man mit Vorliebe ausgezeichnete Punktepaare. Nur Bildorte auf der Achse durch Einstellung auf Scharfe od. dgl. werden bei vielen Verfahren¹ benutzt, so von CORNU. Er bezeichnet den vorderen und hinteren Scheitel S_1 und S_2 des Systems durch Tusche und mißt mit einem Mikroskop den Abstand ε des von S_1 entworfenen Bildes S'_1 von S_2 , sind die Abstände der Brennpunkte von S_1 und S_2 gleich b_1 und b_2 , so ist $b_1(b_2 + \varepsilon) = -f^2$. Andere² Verfahren benutzen die negativen Hauptpunkte. ERLE³ bestimmt die Lage des vorderen Brennpunkts und mißt für zwei Dinglagen die zugehörige Bildverschiebung, er berechnet so f aus den auf die Brennpunkte bezogenen Ding- und Bildabständen z_1, z_2 und $z'_2 - z'_1$. Für die Messung der Brennweite der Zerstreulinse sei auf das Verfahren von HOFFS⁴ hingewiesen. Er stellt sie in solchem Abstand vor dem Objektiv eines Fernrohrs auf, daß die Bildgröße ungeändert bleibt, d. h. im vorderen Brennpunkt des Objektivs. Aus der Verlängerung des Fernrohrs zum Scharfstellen ergibt sich dann f . ABBE⁵ benutzt die Formel $f = h' \sin u$ und mißt zusammengehörige Werte h' und u . Er legt namentlich Wert darauf,

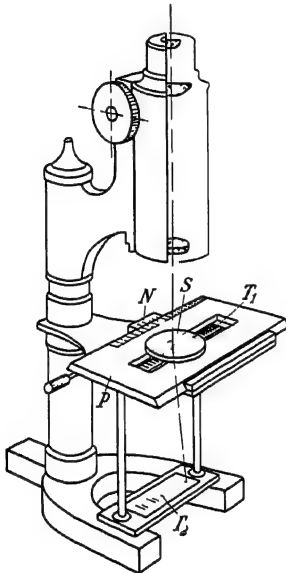


Abb 135 Das ABBEsche Fokometer

von der Feststellung der Lage optischer Bilder auf der Achse unabhängig zu sein, die ihm zu ungenau erscheint, namentlich wenn das System für den Punkt nicht korrigiert ist. Sein Fokometer (Abb 135) zeichnet sich durch Einfachheit und gedrängten Bau aus. Brennweiten beliebiger Größe bei Durchmessern von etwa 20 bis 100 mm können gut gemessen werden, auch zerstreue Systeme ohne Hilfs-system. Es ist im wesentlichen ein umgeändertes Mikroskop. Der Tisch P ist für Querverschiebung eingerichtet, die mit Nonius N auf 0,02 mm abgelesen werden kann. Nahe unter der Tischebene befinden sich eine feine Glasteilung T_1 mit

¹ GAUSS, A N 2, S 371 (1824), CORNU, J de Phys 6, S 276 (1877), MYRIBUS, ibunda 9, S 511 (1890), MARTIN, Bull Soc fr Phot 9, S 473 (1893), BRAKISLEY, Phil Mag 49, S 447 (1900), DONGIER, Science Soc fr de Phys S 50 (1901).

² SILBERMANN, C R 14, S 340 (1830), SCHRODTER, Phot Mitt 23, S 254 (1886), MILLER, Séance Soc fr de Phys 1887, S 193, SENIUS, J de Phys 8, S 283 (1889), THOMPSON, J Soc of Arts 40, S 22 (1891), ANDERSON, Phil Mag 31, S 511 (1891).

³ Z f Instrk 43, S 54 (1923).

⁴ Z f techn Phys 3, S 228 (1922).

⁵ CZAPSKI, Z f Instrk 12, S 185 (1892).

0,1mm Strichabstand, die beiseite geschlagen werden kann, 100 mm tiefer oberhalb des Fußes eine größere zweite geteilte Glasplatte T_2 . Das System S wird nun auf dem Tisch zentriert, bis das Bild der Mitte der unteren Teilung ungefähr auf das Mikroskopfadenkreuz entsteht. Wird nun das System mit dem Tisch seitlich verschoben, so kann die Neigung des Dingstrahles, der zu dem durch die Achse des Mikroskops festgelegten Bildstrahl gehört, durch die Durchstoßungspunkte in den beiden Teilungen festgestellt werden, indem man beobachtet, wo hier das Mikroskopfadenkreuz entsteht. Von der Scharfstellung des Mikroskops ist man dabei unabhängig, da nur ein Bild in der Achse des Mikroskops beobachtet wird. Man wiederholt die Messung mit annähernd der gleichen Verschiebung nach der anderen Seite. Bei FÉRY¹ durchsetzen die von einem Kollimator kommenden Strahlen das meßbar querverschiebbare System und werden von einem Fernrohr aufgenommen, das meßbar gedreht wird, bis es auf die Kollimatormarke entsteht, damit diese nach Einschaltung des Systems scharf gestellt werden kann, besitzt sie größere Verstellung in der Achse.

HARTMANN² mißt in ähnlicher Weise wie ABBE mit Komparator die Vergrößerung einer Teilung dicht unter dem System, um mit Hilfe einer rohen Kenntnis der Brennweite die Lage der Hauptpunkte zu finden. Daneben bestimmt er die genaue Lage des Brennpunkts nach seinem Verfahren und erhält die Brennweite als Abstand dieser Punkte. Im allgemeinen wird bei Fernrohrobjektiven die Brennweite als $y \operatorname{tg} w'$ oder $y' \operatorname{tg} w$ gemessen, wo y bzw. y' die Bildgröße im vorderen bzw. hinteren Brennpunkt ist. Das Objektiv befindet sich in solcher Lage, daß y bzw. y' sich auf die von den beiden Brennebenen bezieht, für die es korrigiert ist. Hierbei kommt es darauf an, daß wirklich in der Brennebene gemessen wird. HARTMANN trennt daher diese Messung von der Ermittlung der Lage der Brennebene. Bei dem einen Verfahren wird die Winkelgröße w einer entfernten Teilung und die lineare Größe y' ihres Bildes gemessen und der Abstand B des Hauptpunkts von der Einstellebene nach der Formel $B = y' \operatorname{tg} w$ ausgerechnet, die Winkelgröße der Teilung wird als ihre Länge dividiert durch den Abstand vom vorderen Hauptpunkt gefunden, der nur roh bekannt zu sein braucht, die Lage der Brennebene wird besonders ermittelt. Die Brennweite ist der Abstand vom Brennpunkt und Hauptpunkt. HARTMANN hat die Anordnung auch umgekehrt, d. h. eine Teilung nahe im Brennpunkt des zu prüfenden Systems angebracht und mit einem Spektrometer, dessen Drehachse nahe im hinteren Knoten- (Haupt-) Punkt liegt, den Winkelabstand der Teilstrichbilder gemessen, um den Hauptpunkt zu finden. Ist die Teilung mit Beleuchtung für Autokollimation versehen, so kann man statt des Fernrohrs auch einen Planspiegel meßbar drehen. Mit dem Apparat von HARTMANN (S 193) wird die Brennweite gemessen, indem ebenfalls neben der Lage des Brennpunkts die des Hauptpunkts ermittelt wird. Zu dem Zweck wird in E ein Raster eingelegt, sein Bild mit dem Fernrohrmikrometer ausgemessen und daraus die Lage des Hauptpunkts berechnet.

Der Hauptpunkt kann ferner nach AIRY und MOËSSARD³ auch durch Drehung des Systems gefunden werden. Dreht man es um den hinteren Hauptpunkt, so ist bei den meisten Systemen die Bewegung des anderen Hauptpunkts gering, und bei nicht zu geringer Entfernung des Ziels wird das Bild dieses Ziels ruhig stehen. Man verschiebt daher das System in der Achse so lange, bis dies erreicht ist, dann liegt der hintere Hauptpunkt über dem Drehpunkt. Zweckmäßig hier-

¹ J de Phys 2, S 755 (1903)

² Z f Instrk 24, S 1 u 109 (1904), Eders Jahrb 17, S 665 (1903)

³ AIRY, Explanation of a proposed Construction of Zenith Sector Addendum 1848, MOËSSARD, Étude des lentilles et objectifs photographiques Paris Gauthier-Villars 1889

fur ist der Knotenpunktsschlitten (Teil von Abb 105) Um auch die Lage des Brennpunkts in ähnlicher Weise bestimmen zu können, dient DIPP¹ bei seinem Phakometer das Objektiv samt einem Planspiegel, der für Autokollimation senkrecht zur Achse davor angeordnet ist Nur das Bild des Brennpunkts fällt hierbei unabhängig von der Drehung mit diesem Punkt selbst zusammen Den Hauptpunkt findet er, indem er nur das Objektiv bei festem Spiegel dreht.

Die Brennweite eines Mikroskopobjektivs kann man bestimmen² indem man die Vergrößerung für einen bestimmten Tubusauszug mit Hilfe eines Objektmikrometers, einer Glasteilung mit 0,01 mm Strichabstand, und eines Okularmikrometers im unteren Brennpunkt des Okulars bestimmt Hat man dann noch die Lage des oberen Brennpunkts des Objektivs ermittelt, so kann man aus der Vergrößerungsformel die Brennweite finden Die Feststellung des Brennpunkts umgeht man, wenn man die Vergrößerung noch für einen zweiten erheblich verschiedenen Tubusauszug mißt Die Brennweite eines Okulars kann man messen, indem man es auf den Mikroskoptisch bringt und das von ihm entworfene Bild einer entfernten Teilung mit dem Okularmikrometer des Mikroskops ausmißt, die Werte, die dem Okularmikrometer für Messungen im Dingraum des Mikroskops zukommen, werden vorher mit einem Objektmikrometer festgestellt Aus dem Abstand der Teilung von dem vorderen Brennpunkt des zu prüfenden Systems und dessen Vergrößerung erhält man die Brennweite Die Lage des vorderen Brennpunkts braucht nur roh bekannt zu sein, er kann auch in umgekehrter Lage des Systems mit dem Mikroskop bestimmt werden Der Planspiegel des Mikroskops muß für das Verfahren genügend eben sein

79 Die optische Messung von Radien Auf optischem Wege können die Radien von Kugelspiegeln durch Feststellung der Größe und des Ortes von Spiegelbildern gemessen werden wie die Brennweite, da ja der Radius gleich der doppelten Brennweite ist Schon SCHEINER³ benutzte dies 1619, um den Radius der Hornhaut des Auges zu bestimmen Hier kommen besonders die Verfahren⁴ in Betracht, bei denen der Krümmungsmittelpunkt und sein Abstand von dem Spiegel bestimmt wird Hat man ein für Autokollimation eingerichtetes Mikroskop, so bringt man auf der optischen Bank den Spiegel einmal in die Stellung, wo die Marke durch das Mikroskopobjektiv in den Kugelmittelpunkt abgebildet und so von diesem Bild als Objekt durch den Spiegel wieder ein zweites Bild an der gleichen Stelle entworfen wird, man erkennt dies daran, daß das schließlich in der Okularbrennebene entstehende Bild gegen die dortige Marke keine Parallaxe zeigt Verschiebt man nun den Spiegel, bis sein Scheitel an den eingestellten Ort rückt, so kann man auf Staubchen auf dem Spiegel einstellen, die Verschiebung ist der Krümmungsradius Auch das Knotenpunktverfahren ist geeignet (Abb 136) F ist ein Fernrohr, mit dem man auf ein von der Kugelfläche K erzeugtes Bild einstellt Die zu prüfende Kugelfläche ist mit Schrauben justierbar auf dem Schlitten $Schl$ befestigt Dieser verschiebt sich auf der Schiene SS , die um die Achse D drehbar ist Wenn man nun durch Justieren und Verschieben erreicht hat, daß das Spiegelbild beim Drehen der Schiene um D sich nicht mehr gegen das Fadenkreuz verschiebt, liegt der Kugelmittelpunkt von K in der Drehachse D Wird nun dieselbe Einstellung bei um 180° gedrehter Schiene

¹ Rev d'Opt 2 S 85 (1923)

² DIPP¹, Grundzüge d allgemeinen Mikroskopie Braunschweig Vieweg 1885

³ Oculus Innsbruck Agricola 1619 Übersetzt von v ROHR, Z f ophth Opt 7, S 38 (1919)

⁴ OUDEMANS A N 54, S 261 (1861), PRYTZ, Ann d Phys 16, S 735 (1905), MOFFILL, Phys Rev 13, S 265 (1919), GUILD, Trans Opt Soc 22, S 127 (1920/1), WEILHAUER, Z f Instrk 41, S 106 (1921), ARNULF, Rev d'Opt 10, S 22 (1931), La mesure des rayons de courbure Paris Verlag d Rev d'Opt 1930

wiederholt, so ist der mechanisch zu messende Abstand der Kugelfläche in den beiden Stellungen gleich dem doppelten Radius. Das unsichere Einstellen auf die Staubchen kann man auf verschiedene Weise vermeiden. Da man das Zusammenfallen des Bildes mit sich selbst nicht gut erkennt, verdoppelt man entweder das Spiegelbild des Fadens, so daß man den Faden mitten zwischen den Doppelfaden sieht, oder man ordnet zwischen Objektiv und Marke einen halbdurchlässigen Spiegel an, der eine zweite Marke so zuspiegelt, daß deren ge-

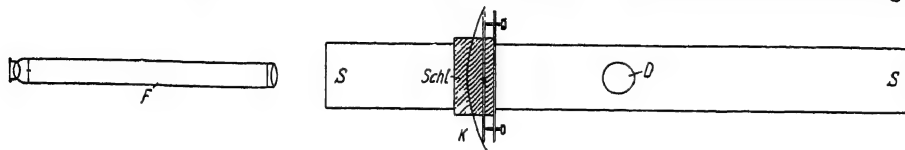


Abb 136 Die Messung von Radien nach WETTHAUER

spiegeltes Bild in derselben Ebene wie der Faden in der Okularbrennebene liegt. Der zu prüfende Spiegel kommt dann an die Stelle zu liegen, die in bezug auf das Objektiv der zugespiegelten Marke und der Okularmarke zugeordnet sind. Man kann auf diese Weise die Marken so verschieden auswählen, daß man gut erkennen kann, ob sie gleichzeitig scharf erscheinen. Nach MORFITT kann man die Krümmung auch durch den Abstand des sagittalen und tangentialen Bildes für den Einfallswinkel 45° messen.

80. Die Messung der optischen Leistung. Die Vergrößerung des Fernrohrs maß schon GALLI, indem er mit dem einen Auge durch das Fernrohr, mit dem anderen daran vorbei einen Gegenstand mit natürlicher Einteilung, z. B. einen Zaun, beobachtete. Am besten ist eine lotrechte Teilung, auch kann man das Fernrohr umgekehrt mit Verkleinerung benutzen. Mit Hilfe astronomischer Objekte maßen DUFOUR und OHNHUISER¹ die Vergrößerung, dieser mißt das Sonnenbild auf einem Schirm in zwei Abständen von der Austrittspupille. Nach LAGRANGE² kann man die Vergrößerung als das Verhältnis der Durchmesser von Ein- und Austrittspupille messen. Wenn die Eintrittspupille das Bild einer Blende ist, kann sie beim Fernrohr und beim photographischen Objektiv mit dem Komparator gemessen werden³, indem man das zu prüfende System von der Einstellung auf den einen Rand des Blendenbildes bis zu der auf den anderen verschiebt. Beim photographischen Objektiv kann man auch das Auge in den hinteren Brennpunkt bringen und durch das Objektiv hindurch beobachten, wie groß der helle Kreis auf einem Maßstab vor dem Objektiv ist⁴. Die Austrittspupille des Fernrohrs mißt man mit dem RAMSDENSchen Dynamometer. Es ist dies eine Lupe von etwa 10facher Vergrößerung, in deren vorderer Brennebene sich eine Teilung von 10 mm Länge und 0,1 mm Strichabstand befindet, eine kleine Blende im hinteren Brennpunkt der Lupe macht von den Bildfehlern der Austrittspupille und der genauen Schaupstellung auf sie unabhängig. Nach Abb 137 trägt das Rohr A am Ende die Teilung, Rohr B die Lupe L, durch Verschieben von B stellt man auf die Teilung, durch die von A auf die Austrittspupille ein. Eine Reihe Einrichtungen zur Messung von Vergrößerung, Öffnung und Gesichtsfeld beschreibt KELLNER⁵. Beim Doppelfernrohr ist die Prüfung

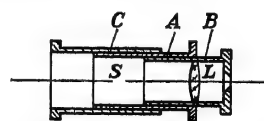


Abb 137 Das RAMSDENSche Dynamometer

¹ DUFOUR, B. S. A. F. 9, S. 19 (1895), OHNHUISER, SIRIUS 40, S. 210 (1907)

² Mém de l'Acad Berlin 1812, S. 3

³ HARTMANN, Eder's Jahrb 18, S. 5 (1904)

⁴ MARTIN, Eder's Jahrb 19, S. 26 (1905)

⁵ J. Instuk 20, S. 1 (1900), Diss. Jena 1899

meist mit der auf Parallelität der optischen Achse verbunden, die für ein zwangloses beidäugiges Sehen wichtig ist. Es möge hier noch auf den Apparat von ZEISS aus dem Jahre 1908¹ eingegangen werden (Abb 138). Er eignet sich für die Prüfung der optischen Leistung eines Doppel Fernrohrs, da mit ihm zugleich die Parallelität der optischen Achsen geprüft werden kann. Als Ersatz

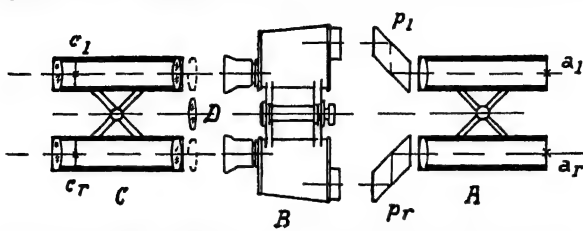


Abb 138 Das Gerät von ZEISS zur Prüfung von Doppel Fernrohren

des Fernziels dient ein Doppelkollimator *A*, dessen beide Rohre und Visierlinien in starrer Verbindung und parallel sind und dessen Objektiven zwei entgegengesetzt drehbare rhombische Prismen p_l, p_r vorgelagert sind, um *A* an den Objektivabstand des zu untersuchenden Fernrohrs *B*

anpassen zu können. Auf der (entgegengesetzten) Bildseite von *B* wird ein Doppelrichtfernrohr *C* mit schwacher Vergrößerung aufgestellt, dessen Rohre und Visierlinien ebenfalls in starrer Verbindung und parallel sind und dessen Objektive genügend groß sind, daß auch bei Einstellung von *B* für verschiedene Augenabstände die aus *B* austretenden Achsenstrahlen noch von *C* aufgenommen werden. In den Brennebenen a_l, a_r, c_l, c_r sind außer den Fadenkreuzen waagrechte Teilungen für Winkelmessungen vorgesehen, die nach den Winkeln abgestuft und beziffert sind, unter denen die von den betreffenden Strichen ausgehenden Strahlen nach dem Austritt aus dem zugehörigen Objektiv gegen die Visierachse von *A* bzw. *C* geneigt sind. Es sei noch bemerkt, daß statt des Doppelkollimators auch eine genügend entfernte Tafel mit entsprechenden Teilungen verwandt werden kann. Sind die beiden optischen Achsen von *B* einander parallel, so müssen die beiden parallelen Visierlinien von *A* nach dem Durchgang durch *B* noch parallel sein. Steht also das Fadenkreuz in c_r auf das Bild des Kreuzes in a_r ein, so muß auch das Kreuz in c_l auf das Bild des Kreuzes in a_l entstehen. Nun braucht die Parallelität nicht streng erreicht zu sein, die Augen können sich ohne Zwang auf mäßig abweichende Blickrichtungen einstellen, namentlich nach innen entsprechend der Einstellung für die Nahe dürfen die Augenachsen um größere Winkel verschwenkt sein. Man bringt daher in c_l ein Grenzrechteck an, innerhalb dessen das Bild des Kreuzes entstehen muß. Bei Prismenfernrohren kann infolge von Fehlern der Prismen oder ihrer Lagerung das Bild in achsensenkrechter Ebene verdreht sein, man erkennt dies daran, ob die Fadenkreuzbilder in *a* mit den Fadenkreuzen in *c* gleichgerichtet sind. Namentlich kommt es darauf an, daß kein Unterschied in den Verdrehungen für die rechte und linke Seite vorhanden ist. Den Unterschied in den Vergrößerungen erhält man aus den Messungen der Vergrößerungen für den rechten und linken Teil von *B*. Ist *C* unmittelbar auf *A* gerichtet, so stimmen die Bilder der Winkelteilungen in a_l und a_r nach der Größe mit den Winkelteilungen in c_l und c_r überein, 1° entspricht wieder 1° , ist aber ein Doppel Fernrohr *B* mit 5facher Vergrößerung zwischengeschaltet, so sind die Bilder der Winkelteilungen 5mal vergrößert, 1° in a_l und a_r entspricht 5° in c_l und c_r .

Auch das Verhältnis von Eintritts- und Austrittspupille gibt die Vergrößerung. Die Austrittspupille hat man ohnehin zu messen, da sie die Helligkeit bestimmt. Zu dem Zweck schaltet man vor das betreffende Objektiv von *C* eine

¹ SHACKLETON, Proc Opt Convention 2, S 138 (1912), SMITH, J Opt Soc Amer 2 3, S 76 (1919), RAIBAUD, Rev d'Opt 1, S 481 (1922)

Lupe D und schiebt C so weit zurück, daß ein scharfes Bild der Austrittspupille in c_i bzw. c_r entsteht. Bei einer Brennweite von D von 57,3 mm kann die Winkelteilung in c_i bzw. c_r ohne weiteres als mm-Teilung zum Messen des Durchmessers der Austrittspupille dienen. Diese Einrichtung ist auch für holländische Fernrohre mit virtueller Austrittspupille brauchbar. Wenn man nicht sicher ist, daß die Objektivfassung von B als Eintrittspupille wirkt, indem Blenden dahinter den Achsenstrahlenquerschnitt verringern, setzt man eine kleinere Blende vor B und stellt fest, wievielfach diese größer ist als ihr von B entworfenes Bild. Die nach den beiden Verfahren ermittelten Vergrößerungen werden zuweilen nicht genau übereinstimmen (S. 129). Um das dingsseitige Gesichtsfeld zu messen, schiebt man C beiseite und beobachtet unter Hineinschauen in B , welches Stück der Winkelteilung in a_i bzw. a_r durch die Gesichtsfeldblende von B ausgeschnitten wird. Bei holländischen Fernrohren muß bei der Gesichtsfeldmessung eine kleine Blende am Augennort angebracht werden, gewöhnlich setzt man sie 10 mm hinter die Augenlinse, außerdem muß darauf geachtet werden, daß das Kollimatorobjektiv nicht das Gesichtsfeld abblendet und bei der weit zurückliegenden Eintrittspupille dieses Fernrohrs nicht merkliche Verzeichnung besitzt. Bei den Messungen aller dieser Bestimmungsgrößen ist darauf zu achten, daß die Okulare von B für den Austritt von Parallelbündeln eingestellt sind, man bewirkt dies unabhängig von dem Augenzustand des Beobachters, wenn man die Okulare von B so einstellt, daß die Fadenkreuze in a_i bzw. a_r ohne Parallaxe auf die Kreuze in c_i bzw. c_r abgebildet werden. Damit wird zugleich der Nullpunkt der Dioptrienteilung der Okulare von B geprüft.

Endlich sei noch auf die Messung der Lichtdurchlässigkeiten von Objektiven und Fernrohren hingewiesen¹. Beim Fernrohr bestimmt man die Beleuchtungsstärke der Austrittspupille, MOFFITT und TAYLOR ziehen aber vor, die des Fernrohrbildes zu messen. Ein Kollimator liefert bei ihrem Verfahren ein entferntes Objekt von kleiner Größe, dessen Helligkeit mit einem Photometer einmal unmittelbar, das andere Mal nach Einschalten des Fernrohrs gemessen wird. Das Photometer enthält ein Fernrohr mit der Vergrößerung 1, dessen Austrittspupille durch eine Blende kleiner als die des zu untersuchenden Fernrohrs gehalten wird. Für die Messung der Lichtdurchlässigkeit von Prismen siehe noch BAROT².

¹ KRÜSS, Z f Instrk 23, S. 8 (1903), CHILSHIRE, Proc Opt Conv 2, S. 34 (1912), WRIGHT, J Opt Soc of Amer 2-3, S. 65 (1919), GUILD, Trans Opt Soc 23, S. 205 (1921/2), MOFFITT, J Opt Soc Amer 4, S. 83 (1920), J Franklin Inst 190, S. 260 (1920), PELZER, Diss. Aachen 1926, Z f Instrk 46, S. 354 (1926), HRDLÍČKA, Č R 189, S. 153 (1929), Rev d'Opt 9, S. 149 (1930), MOFFITT u. TAYLOR, J Opt Soc Amer 8, S. 511 (1924), MOURASHINSKY, Optik des Handfernrohrs, Leningrad 1925 (russisch).

² Rev d'Opt 3, S. 459 (1924).

Kapitel 3

Spektroskopie.

Von

C RUNGE †-Göttingen

Ergänzt von K. W. MEISSNER-Frankfurt a M

Mit 24 Abbildungen

a) Theorie der Lichtbrechung durch Prismen.

1 Zerlegung des Lichtes Um eine Lichtquelle auf ihre farbigen Bestandteile hin zu untersuchen, haben wir uns verschiedene Aufgaben zu stellen. Vor allem müssen wir Mittel finden, um die verschiedenen Farben voneinander zu trennen. Die nächste Aufgabe ist dann, die verschiedenfarbigen Bestandteile nach Schwingungszahl und Intensität zu messen.

Das erste Ziel wird erreicht durch jedes Experiment, bei dem das Licht je nach seiner Farbe sich verschieden verhält oder, genauer gesprochen, bei dem das Verhalten des Lichtes eine Funktion seiner Wellenlänge ist. Es stehen uns eine große Menge verschiedener Wege offen, aber die Praxis hat darunter nur zwei als hervorragend brauchbar erkannt: die Brechung und die Beugung des Lichtes.

2 Die Brechung des Lichtes beruht auf dem Umstande, daß die Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen durchsichtigen Medien verschieden sein kann, und die bei der Brechung auftretende Farbenzerstreuung wieder darauf, daß das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten in den beiden Medien mit der Farbe des Lichtes sich ändern kann. Wir betrachten zunächst die Brechung für Licht einer bestimmten Farbe.

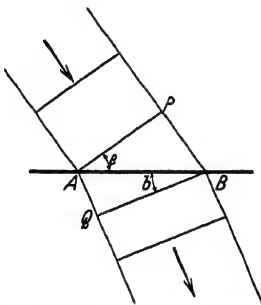


Abb 1 Brechung einer Lichtwelle an einer ebenen Fläche

Grenzt ein Medium mit einer ebenen Grenzfläche an ein zweites und ist für Licht von einer bestimmten Schwingungszahl die Lichtgeschwindigkeit und damit also die ihr proportionale Wellenlänge in dem zweiten Medium z B kleiner als in dem ersten, so werden ebene Lichtwellen, die in dem ersten Medium schräg auf die Grenzfläche fallen, gebrochen in der durch die Abbildung dargestellten Weise. Die Wellenebenen und die Grenzfläche sind dabei senkrecht zur Ebene der Zeichnung gedacht. Die Wellenlänge PB im ersten Medium wird im zweiten Medium auf AQ verkleinert, und die Winkel der Wellenebenen mit der Grenzfläche stehen in der Beziehung

$$\frac{\sin PAB}{\sin ABQ} = \frac{PB}{AQ} = \frac{v_1}{v_2},$$

wenn v_1 und v_2 die Lichtgeschwindigkeiten im ersten und zweiten Medium bedeuten. Den Winkel PAB nennen wir den Eintrittswinkel, den Winkel ABQ den Brechungswinkel und bezeichnen sie mit e und b . Konstruieren wir auf der Grenzfläche die Normale nach der Seite hin, nach der die Lichtbewegung läuft, so können wir Eintritts- und Brechungswinkel auch als die Winkel definieren, die der einfallende und der gebrochene „Strahl“ mit dieser Normalen bilden.

Das durch die Gleichung (1) ausgedruckte Brechungsgesetz besagt, daß der Sinus des Einfallswinkels sich zum Sinus des Austrittswinkels verhält wie die Lichtgeschwindigkeit im ersten Medium zu der im zweiten. Beide Winkel sind spitz, und es ist daher $e > b$, wenn $v_1 > v_2$, dagegen $e < b$, wenn $v_1 < v_2$.

3 Das Brechungsdreieck Wir wollen das Brechungsgesetz noch durch eine zweite Abbildung darstellen, in der wir die beiden Strahlen durch Vektoren repräsentieren, deren Betrag den Wellenlängen in beiden Medien umgekehrt proportional ist, und beide Vektoren von einem Punkte O aus abtragen. OE sei der einfallende, OB der gebrochene Strahl und $OE/OB = v_2/v_1$. Das Brechungsgesetz läßt sich dann so aussprechen, daß die dritte Seite des Dreiecks OEB , die Verbindungslinie EB , auf der Grenzfläche senkrecht stehen muß. Wir nennen OEB das Brechungsdreieck. Es treten aber zwei verschiedene Fälle auf, je nachdem $e > b$ oder $b > e$. Im ersten Fall hat EB die Richtung vom ersten zum zweiten Medium, im zweiten Fall die vom zweiten zum ersten. Wir wollen im ersten Fall von einer positiven Brechung sprechen, im zweiten von einer negativen. Im ersten Fall, in der die reziproke Lichtgeschwindigkeit zunimmt, wird durch die Brechung der Strahl der Normalen genähert, im zweiten Fall, wo die reziproke Lichtgeschwindigkeit abnimmt, wird er von der Normalen entfernt.

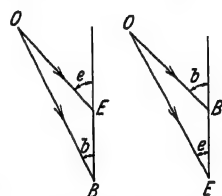


Abb 2 Brechungsdreiecke

4 Brechung durch ein Prisma Wollen wir nun den Durchgang eines Strahles durch ein Prisma verfolgen, bei dem der gebrochene Strahl auf eine zweite Grenzfläche trifft, durch die er mit einer der ersten Brechung im Vorzeichen entgegengesetzten Brechung wieder in das erste Medium eintritt, so erlaubt die Konstruktion der Abb 3, die eintretenden Richtungen zu übersehen. Wir nehmen zunächst an, daß die Normalen der beiden brechenden Flächen mit dem einfallenden Strahl in einer Ebene liegen, mit anderen Worten, daß die Schnittlinie der beiden Grenzflächen (die sog. brechende Kante des Prismas) auf dem eintretenden Strahl senkrecht steht, und daß die Lichtgeschwindigkeit im Prisma kleiner ist als die im umgebenden Medium. Da die zweite Brechung negativ ist, so haben wir BE' der Richtung der zweiten Normale entgegengesetzt zu ziehen und $OE' = OE$ zu machen, dann stellt der Vektor OE' den aus dem Prisma austretenden Strahl dar. Der Winkel EOE' ist die Gesamtablenkung und EBE' der brechende Winkel des Prismas. Das Verhältnis $OB/OE = v_1/v_2 = n$ heißt der Brechungsindex des zweiten Mediums gegen das erste.

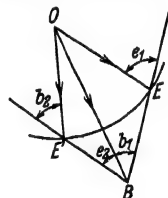


Abb 3 Brechungsdreiecke eines Prismas

5 Veränderung der Ablenkung mit der Lage des Prismas zum einfallenden Strahl Drehen wir das Prisma um seine brechende Kante und denken wir uns dabei die Richtung des einfallenden Lichtes so geändert, daß der im Prisma verlaufende Strahl seine Richtung OB beibehält, dann rücken die Punkte E und E' auf dem mit dem Radius OE um O beschriebenen Kreisbogen in gleichem Sinne entlang. Es ist unmittelbar zu sehen, daß die Gesamtablenkung EOE' am kleinsten ist, wenn OB den Winkel EBE' halbiert, wenn also der einfallende und der aus dem Prisma austretende Strahl zu den brechenden Flächen symmetrisch

liegen. Denn wenn BE sich um den Winkel $d\varphi$ um B dreht, so verschiebt sich E um

$$ds = \frac{BE d\varphi}{\cos e_1}$$

Je größer b_1 , um so größer werden BE und e_1 , um so größer also auch $BE/\cos e_1$, und analog verschiebt sich E' um

$$ds' = \frac{BE' d\varphi}{\cos b_2},$$

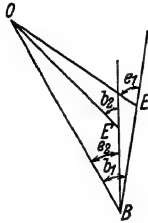


Abb 4 Brechungsdreiecke eines Prismas und der Durchgang des Strahles durch das Prisma

und $BE'/\cos b_2$ ist um so größer, je größer e_2 . Mit anderen Worten bei der Drehung des Winkels $E'BE$ um B wird von den beiden Punkten E und E' derjenige sich rascher verschoben, der von der Linie OB weiter entfernt ist. Daraus folgt, daß der Bogen EE' sich von der zu OB symmetrischen Lage aus bei der Drehung vergrößert, nach welcher Seite man auch dreht.

Den größten Winkel EOE' erhält man, wenn BE oder BE' den Kreisbogen berührt, d. h. bei streifendem Ein- bzw Austritt des Strahles. In diesem Grenzfall ist $\sin b_1 = v_2/v_1$ oder $\sin e_2 = v_2/v_1$. Wenn der Sinus des Brechungswinkels EBE' kleiner ist als v_2/v_1 , so können E und E' auch auf derselben Seite von OB liegen. Wir werden dann gut tun, e_2 und b_2 Vorzeichen zu geben, die denen von e_1 und b_1 entgegengesetzt sind, damit auch in diesem Falle $b_1 + e_2$ der brechende Winkel und $e_1 + b_2 - (b_1 + e_2)$ die Gesamtablenkung sei.

Abb 4 zeigt für einen solchen Fall den Querschnitt des Prismas und den Durchgang des Lichtes zugleich mit den Brechungsdreiecken.

6 Das Minimum der Ablenkung Das Minimum der Ablenkung tritt ein, wenn $e_1 = b_2$ und $b_1 = e_2$, daher $b_1 = \alpha/2$ (α gleich brechender Winkel) und $e_1 = \frac{D + \alpha}{2}$ (D gleich Gesamtablenkung) und wegen des Brechungsgesetzes

$$\sin \frac{D + \alpha}{2} = n \sin \frac{\alpha}{2}$$

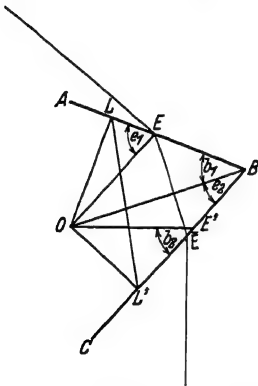


Abb 5 Zusammenhang des Austritts- und Eintrittswinkels beim Prisma

Nach dieser Gleichung berechnet sich der Brechungsindex n aus den Messungen der Gesamtablenkung D und des Brechungswinkels α (Methode von FRAUNHOFER).

7 Zweite graphische Konstruktion der Ablenkung durch ein Prisma Statt durch das in Ziffer 4 geschilderte Verfahren kann man die Brechung eines Lichtstrahles durch ein Prisma auch auf folgende Weise konstruieren. Es stelle in Abb 5 ABC den Querschnitt des Prismas senkrecht zur brechenden Kante dar, die durch B läuft. Der Strahl treffe die erste brechende Fläche in E . Wir konstruieren das Dreieck BEO , in dem sich die Seiten EO und BO wie 1 zu n verhalten. Von E aus ziehen wir EE' senkrecht zu BO und schlagen mit OE einen Kreisbogen um O bis zum Radius OE' . Der austretende Strahl verläßt dann die zweite brechende

Fläche bei E' in der Richtung senkrecht zu OE' . In $OEBE'$ erkennen wir die frühere Abb 3 der beiden Brechungsdreiecke wieder, nur daß sie um 90° gedreht ist, entsprechend den Richtungen der drei Strahlen. Fällt man von O aus Lote OL und OL' auf die brechenden Flächen, so ist $BLOL'$ ein Kreisviereck mit dem Durchmesser $BO = n OE$ und, da in dem Dreieck LOL' die Seiten OL ,

OL' , LL' den Peripheriewinkeln b_1 , e_2 , α (brechender Winkel $= b_1 + e_2$) gegenüberliegen, so sind sie gleich

$$OL = OB \sin b_1 = OE n \sin b_1 = OE \sin e_1,$$

$$OL' = OB \sin e_2 = OL n \sin e_2 = OE \sin b_2,$$

$$LL' = OB \sin \alpha = OE n \sin \alpha,$$

und mithin ist nach dem Kosinussatz

$$\sin^2 e_1 + \sin^2 b_2 + 2 \sin e_1 \sin b_2 \cos \alpha = n^2 \sin^2 \alpha,$$

eine Formel, die unmittelbar die beiden Winkel e_1 und b_2 miteinander verknüpft, ohne daß man b_1 und e_2 zu betrachten braucht

8 Allgemeine Berechnung des Brechungsindex Um allgemein aus den Messungen von e_1 , b_2 , $\alpha = e_2 + b_1$ und $D = e_1 + b_2 - \alpha$, die sich mit dem Spektrometer ausführen lassen, den Brechungsindex $n = v_1/v_2$ zu berechnen, formt man am besten die beiden Gleichungen

$$\sin e_1 = n \sin b_1,$$

$$\sin b_2 = n \sin e_2$$

um, indem man sie zueinander addiert und voneinander subtrahiert Nach Weglassung des Faktors 2 erhält man dann

$$\sin \frac{e_1 + b_2}{2} \cos \frac{e_1 - b_2}{2} = n \sin \frac{b_1 + e_2}{2} \cos \frac{b_1 - e_2}{2},$$

$$\sin \frac{e_1 - b_2}{2} \cos \frac{e_1 + b_2}{2} = n \sin \frac{b_1 - e_2}{2} \cos \frac{b_1 + e_2}{2}$$

In diesen beiden Gleichungen sind n und $\frac{b_1 - e_2}{2}$ die beiden Unbekannten, da wir e_1 , b_2 , $b_1 + e_2 = \alpha$ als gemessen annehmen Durch Division der linken und rechten Seiten hat man dann

$$\operatorname{tg} \frac{e_1 - b_2}{2} \cotg \frac{e_1 + b_2}{2} = \operatorname{tg} \frac{b_1 - e_2}{2} \cotg \frac{b_1 + e_2}{2}$$

oder

$$\operatorname{tg} \frac{b_1 - e_2}{2} = \operatorname{tg} \frac{e_1 - b_2}{2} \cotg \frac{D + \alpha}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich $\frac{b_1 - e_2}{2}$ und damit

$$n = \frac{\sin \frac{D + \alpha}{2} \cos \frac{e_1 - b_2}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{b_1 - e_2}{2}} = \frac{\sin \frac{e_1 - b_2}{2} \cos \frac{D + \alpha}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2} \sin \frac{b_1 - e_2}{2}}$$

Sind $\frac{e_1 - b_2}{2}$ und $\frac{b_1 - e_2}{2}$ klein genug, d. h. ist man der symmetrischen Stellung nahe genug, so kann man bei Vernachlässigung eines Bruchteils von n von der Größe

$$\frac{1}{2} \left(\frac{b_1 - e_2}{2} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{e_1 - b_2}{2} \right)^2 = -\frac{1}{2} \left(\frac{e_1 - b_2}{2} \right)^2 \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\operatorname{tg} \frac{D + \alpha}{2}} \right)$$

(bis auf Größen vierter Ordnung) die Formel anwenden, die für das Minimum der Ablenkung gilt,

$$n = \frac{\sin \frac{D + \alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}$$

Selbst wenn α ϵ_1 und ϵ_2 um einen Grad voneinander abweichen, so wird der Wert von n auf einen Bruchteil richtig sein, der kleiner ist als $1 \cdot 10^{-5}$

9 Ablenkung durch zwei Prismen Wird der aus dem Prisma austretende Strahl durch ein zweites Prisma, dessen brechende Kante der des ersten parallel ist, abermals abgelenkt, so kann der weitere Verlauf des Strahles durch eine Erweiterung der Abb 3

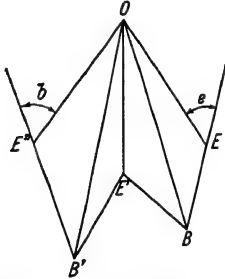


Abb 6 Brechungsdreiecke bei zwei Prismen

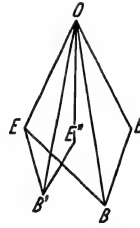


Abb 7 Entgegengesetzte Brechungsdreiecke zweier Prismen

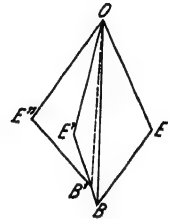


Abb 8 Brechungsdreiecke zweier aneinanderliegender Prismen

dargestellt werden, wie Abb 6 zeigt BE' und $B'E''$ geben die Richtungen der Normalen der brechenden Flächen des zweiten Prismas an OB' ist die Richtung des Strahles im Innern des zweiten Prismas und OE'' die Richtung des aus dem zweiten Prisma austretenden Strahles Es ist $OE = OE' = OE''$, und OB'/OE ist der Brechungsindex des zweiten Prismas, so daß, wenn beide Prismen aus demselben Material bestehen, $OB = OB'$ ist In dem Falle der Abb 6 hat die Ablenkung, die das zweite Prisma hervorruft, den gleichen Sinn wie die des ersten Den

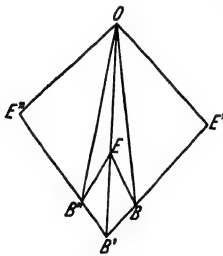


Abb 9 Brechungsdreiecke beim geradsichtigen Prisma

anderen Fall stellt Abb 7 dar Wir wollen noch den Fall zeichnen, wo das zweite Prisma sich an das erste anlegt so daß die erste brechende Fläche des zweiten Prismas mit der zweiten des ersten Prismas zusammenfällt Die Brechungsexponenten der beiden Prismen sollen indessen voneinander verschieden sein (Abb 8) Wurden die Brechungsindizes gleich angenommen, so würden B und B' zusammenfallen Dann wirken die beiden Prismen wie eins mit dem brechenden Winkel EBE'' und der Gesamtablenkung EOE'' Da der OE' entsprechende Strahl nicht zur Erscheinung kommt, so kann man dann die Linien OE' und $B'E'$ fortlassen

10 Das geradsichtige Prisma Endlich wollen wir noch den Fall dreier Prismen zeichnen, die aneinandergelegt sind und keine Gesamtablenkung geben Das erste und dritte Prisma sollen gleichen, das zweite einen größeren Brechungsindex haben (Abb 9) Die Wirkung des ersten Prismas wird durch das Viereck $OEBE'$ dargestellt, die des zweiten durch $OE'B'E''$ und die des dritten durch $OE''B''E$ OB, OB', OB'' sind die Richtungen des Strahles im Innern der drei Prismen, während OE die Richtung beim Eintritt in das erste Prisma und beim Austritt aus dem dritten darstellt

11 Schräger Durchgang durch ein Prisma Es möge nun der allgemeine Fall des Durchgangs durch ein Prisma betrachtet werden, wenn der einfallende

Strahl nicht auf der brechenden Kante senkrecht steht. Die Abb 3 stellt auch in diesem Fall den Verlauf des Strahles dar. Nur liegt jetzt die Normale BE' der zweiten brechenden Fläche nicht mehr in der Einfallsebene OEB , in welcher der Strahl sowohl vor seinem Eintritt in das Prisma wie während seines Laufes durch das Prisma verläuft, so daß die Austrittsebene $OE'B$ nicht mehr mit der Eintrittsebene zusammenfällt. Es bleibt aber $OE = OE'$, da ihr Verhältnis zu OB durch den Brechungsindex bestimmt ist, und EBE' bleibt, da BE und BE' die Normalen der brechenden Flächen sind, zur brechenden Kante des Prismas senkrecht. Wir können uns die Abb 3 so vorstellen, daß $E'BE$ in der Ebene der Zeichnung liegt, während O den Mittelpunkt einer Kugel vom Radius $OE = OE'$ darstellt, die von der Ebene $E'BE$ nicht mehr in einem großen Kreise, sondern in einem kleineren Kreise geschnitten wird. Der Mittelpunkt dieses Kreises ist der Fußpunkt des von O auf die Zeichenebene gefallten Lotes. Daraus folgt unmittelbar, daß der eintretende und der austretende Strahl (OE und OE') mit der Zeichenebene, also auch mit der brechenden Kante (die ja auf der Zeichenebene senkrecht steht), gleiche Winkel bilden. Die senkrechten Projektionen der Strahlen OE und OE' auf die Zeichenebene liegen genau so wie in dem oben betrachteten Fall die Strahlen selbst. Bezeichnet also ε den Winkel, welchen OE und OE' mit der Zeichenebene machen, und β den Winkel, welchen OB , d. h. der im Prisma verlaufende Strahl, mit der Zeichenebene macht, so sind $OE \cos \varepsilon$, $OE' \cos \varepsilon$, $OB \cos \beta$ die Projektionen auf die Zeichenebene, d. h. es ist

$$\frac{OB \cos \beta}{OE \cos \varepsilon} = \frac{v_1 \cos \beta}{v_2 \cos \varepsilon} = n \frac{\cos \beta}{\cos \varepsilon}$$

Für die Projektionen auf die Zeichenebene haben wir mithin denselben Verlauf, als ob wir es mit einem Brechungsindex $\nu = n \frac{\cos \beta}{\cos \varepsilon}$ zu tun hätten.

Das Lot von O auf die Zeichenebene ist sowohl gleich $OB \sin \beta$ wie gleich $OE \sin \varepsilon$, daher $\sin \varepsilon / \sin \beta = OB / OE = n$ und folglich

$$\nu^2 = n^2 \frac{1 - \sin^2 \beta}{\cos^2 \varepsilon} = \frac{n^2}{\cos^2 \varepsilon} - \frac{1}{\cos^2 \varepsilon} + 1$$

oder

$$(\nu^2 - 1) = \frac{(n^2 - 1)}{\cos^2 \varepsilon}$$

oder

$$\nu^2 - n^2 = (n^2 - 1) \tan^2 \varepsilon.$$

Je größer also der Winkel ε , den der einfallende Strahl mit der brechenden Kante bildet, um so größer ist der Brechungsindex ν anzusetzen, nach dem die Projektionen auf der zur brechenden Kante senkrechten Ebene verlaufen.

Die Gesamtablenkung D ist der Winkel, den die Richtung OE' des austretenden Strahles mit der Richtung OE des eintretenden bildet. Bedeutet D' den Winkel zwischen den Projektionen auf die Zeichenebene, so ist der Zusammenhang zwischen D und D' unmittelbar durch die Betrachtung der halben Sehne $\frac{1}{2}EE'$ der räumlich aufgefaßten Abb 3 gegeben. Denn einmal ist sie gleich

$$OE \sin D/2$$

und andererseits gleich

$$OE \cos \varepsilon \sin D'/2$$

Mithin ist

$$\sin D/2 = \sin D'/2 \cos \varepsilon$$

Die Abb 3, räumlich aufgefaßt, zeigt uns auch, daß bei einem gegebenen brechenden Winkel EBE' und gegebenem Brechungsindex $n = OB/OE$ das Minimum der Ablenkung $\angle EOE'$ eintritt, wenn B, E, O, E' in einer Ebene liegen und BO mit BE

und BE' gleiche Winkel bildet. Denn wenn wir BO und die Kugel um O mit dem Radius BO/n festhalten und den Winkel EBE' beliebig um B bewegen, wo E und E' die Punkte bedeuten, in denen die Schenkel des Winkels die Kugel von B aus zum erstenmal treffen, so wird der Winkel EOE' in jener symmetrischen Lage so klein wie möglich. Wenn man daher durch ein Prisma auf einen im Unendlichen parallel der brechenden Kante liegenden Spalt blickt, so wird er gekrümmt erscheinen, und zwar konkav nach der brechenden Kante hin. Denn die Blickrichtung wird um so weiter von der dem einfallenden Strahl entgegengesetzten Richtung abweichen, je stärker er abgelenkt wird.

12 Krümmung der Linien eines Prismenspektrums Denken wir uns einen Spalt parallel der brechenden Kante, von dem einfarbiges Licht ausgeht, das durch eine Linse parallel gemacht wird. Das von der Mitte des Spaltes ausgehende Licht soll senkrecht zur brechenden Kante eines Prismas aus der Linse austreten und auf die eine Fläche des Prismas fallen, während die von den anderen Spaltpunkten herrührenden parallelen Lichtbündel gegen die brechende Kante geneigt sind. Nach dem Durchgang durch das Prisma sollen die Bündel durch eine zweite Linse in ihrer Brennebene punktförmig vereinigt werden. Die Achse der Linse sei dabei senkrecht zur brechenden Kante, so daß der Mittelpunkt des Spaltes in der Achse abgebildet wird. Das Bild des Spaltes erscheint dann gekrümmt. Wir wollen die Gestalt des Bildes untersuchen.

Ein Strahl, der gegen die zur brechenden Kante senkrechte Ebene geneigt ist, möge den Winkel ε mit ihr machen. Wir denken ihn uns auf diese Ebene senkrecht projiziert. Die senkrechte Projektion durchläuft das Prisma, wie in Ziff 11 gezeigt wurde, gerade so, als ob sie ein Prisma von derselben Form, aber mit einem anderen Brechungsindex ν durchliefe, wo

$$\nu^2 - n^2 = (n^2 - 1) \operatorname{tg}^2 \varepsilon$$

Bezeichnen wir den Einfallswinkel der Projektion mit e_1 und den Austrittswinkel mit b'_1 , während b_2 den Austrittswinkel eines Strahles bezeichnet, der in der Projektionsebene mit demselben Einfallswinkel e_1 durch das Prisma abgelenkt wird, so ist nach Ziff 7

$$\sin^2 e_1 + 2 \sin e_1 \sin b_2 \cos \alpha + \sin^2 b_2 = n^2 \sin^2 \alpha$$

und

$$\sin^2 e_1 + 2 \sin e_1 \sin b'_1 \cos \alpha + \sin^2 b'_1 = \nu^2 \sin^2 \alpha$$

Durch Subtraktion der beiden Gleichungen erhalten wir

$$\sin^2 b'_1 - \sin^2 b_2 + 2 \sin e_1 \cos \alpha (\sin b'_1 - \sin b_2) = (\nu^2 - n^2) \sin^2 \alpha$$

Wenn man der Kurze halber

$$\sin b'_1 - \sin b_2 = u, \quad \text{also} \quad \sin^2 b'_1 - \sin^2 b_2 = u(u + 2 \sin b_2)$$

setzt, so erhält man für u die quadratische Gleichung

$$u^2 + 2(\sin b_2 + \sin e_1 \cos \alpha)u = (\nu^2 - n^2) \sin^2 \alpha$$

und damit

$$u = \sqrt{(\nu^2 - n^2) \sin^2 \alpha + (\sin b_2 + \sin e_1 \cos \alpha)^2} - (\sin b_2 + \sin e_1 \cos \alpha)$$

Die Wurzel ist mit dem positiven Vorzeichen zu nehmen, weil u für $\nu = n$ verschwindet. Zur bequemeren Berechnung führe man den Hilfswinkel β ein gemäß

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sqrt{\nu^2 - n^2} \sin \alpha}{\sin b_2 + \sin e_1 \cos \alpha},$$

dann ist

$$n = \sin b'_2 - \sin b_2 = \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \sin \alpha \sqrt{n^2 - 1}$$

oder, wenn man für $n^2 - 1$ seinen Ausdruck in ε einsetzt,

$$\sin b'_2 - \sin b_2 = \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \sin \alpha \sqrt{n^2 - 1} \operatorname{tg} \varepsilon,$$

wo

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sqrt{n^2 - 1} \sin \alpha}{\sin b_2 + \sin e_1 \cos \alpha} \operatorname{tg} \varepsilon$$

Das Bild des Spaltes in der auf der Richtung b_2 senkrecht stehenden Fokalebene stellen wir in rechtwinkligen Koordinaten x, y dar. Die x -Achse verlaufe senkrecht zur brechenden Kante, und der Anfangspunkt liege da, wo die vom Mittelpunkt des Spaltes ausgehenden Strahlen die Fokalebene treffen. Ist f die Brennweite, so haben wir

$$x = f \operatorname{tg} (b'_2 - b_2), \quad y = \frac{f}{\cos (b'_2 - b_2)} \operatorname{tg} \varepsilon$$

Für kleine Werte von ε ist β klein von derselben Ordnung, $\sin b'_2 - \sin b_2$ und damit $b'_2 - b_2$ sind von der Ordnung ε^2 . Bei Vernachlässigung der Glieder von der Ordnung ε^4 haben wir dann

$$(b'_2 - b_2) \cos b_2 = \frac{1}{2} \frac{\sin^2 \alpha (n^2 - 1)}{\sin b_2 + \sin e_1 \cos \alpha} \varepsilon^2$$

und somit angenähert

$$x = f m \varepsilon^2, \quad y = f \varepsilon,$$

wo m der kurze halber für

$$\frac{1}{2} \frac{\sin^2 \alpha (n^2 - 1)}{\cos b_2 (\sin b_2 + \sin e_1 \cos \alpha)}$$

geschrieben ist. m ist das Verhältnis der halben Brennweite zum Krümmungsradius der Linie im Nullpunkt.

Sind die von der Mitte des Spaltes ausgehenden Strahlen beim Durchgang durch das Prisma im Minimum der Ablenkung, so ist $b_2 = e_1$ und $\sin e_1 = n \sin \alpha / 2$.

Wir erhalten dann in der Gleichung

$$\sin b'_2 - \sin b_2 = \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \sin \alpha \sqrt{n^2 - 1} \operatorname{tg} \varepsilon$$

für $\operatorname{tg} \beta$ den Ausdruck

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n} \frac{\operatorname{tg} \varepsilon}{\cos \alpha / 2}$$

Für kleine Werte von ε gehen daher die Ausdrücke für die Koordinaten der Spektrallinie über in

$$x = f m \varepsilon^2, \quad y = f \varepsilon,$$

wo

$$m = \operatorname{tg} e_1 \frac{n^2 - 1}{n^2}$$

Bei den Spektroheliographen kommt es vor, daß man bei der Abbildung des Sonnenbildes den Winkel ε bis etwa 6° , also bis $\varepsilon = 0,1$ gehen läßt. Die Vernachlässigung von ε^4 in dem Ausdruck für x und von ε^3 in dem Ausdruck für y bedeutet dann einen relativen Fehler von der Ordnung ε^2 . Wenn also für $\varepsilon = 0,1$ Fehler von der Ordnung eines Prozentes vermieden werden sollen, so reicht diese Annäherung nicht aus¹. Es hat aber gar keine Schwierigkeit, nach den genauen Gleichungen zu rechnen.

¹ Vgl. W. S. ADAMS, The Curvature of the Spectral Lines in the Spectroheliograph, Ap J 41, S. 309 (1900).

Steht die Fokalebene nicht senkrecht auf der optischen Achse, so wird die Krümmung der Spektrallinie entsprechend geändert. Wird ferner Licht anderer Wellenlänge betrachtet, für das der vom Mittelpunkt des Spaltes durch die Mitte der ersten Linse laufende Strahl schräg zur optischen Achse aus der zweiten Linse austritt, so ist die Entfernung bis zum Bildpunkt an die Stelle von f zu setzen, wenn wir uns die Bildebene wieder senkrecht zu diesem Strahl denken.

Über die Krümmung der Spektrallinien beim Durchgang durch einen Prismensatz wird weiter unten gehandelt.

13 Minimum der Gesamtablenkung eines Strahles durch einen Prismensatz Die Ablenkung eines Lichtstrahles durch zwei Prismen, auf deren zueinander parallelen brechenden Kanten er senkrecht steht, ist oben in Abb 6 dargestellt worden. Die Gesamtablenkung D ist durch den Winkel EOE'' dargestellt. Aus der Abbildung erhellt sofort, daß die Gesamtablenkung D gleich ist der Summe des ersten Eintrittswinkels und des letzten Austrittswinkels, vermindert um den Winkel, den die erste Normale BE mit der letzten Normalen $B'E''$ macht. Denn man kann von der Richtung OE in die Richtung OE'' übergehen, indem man die Richtung OE zunächst in die Richtung EB , dann in die von $E''B'$ und endlich in die Richtung OE'' dreht. Wir sind dabei nicht daran gebunden, die Lichtgeschwindigkeit in den beiden Prismen oder auch in den Medien vor, zwischen und hinter den beiden Prismen gleich anzunehmen. Es müssen nur in der Abbildung die Längen OE, OB, OE', OB', OE'' den Lichtgeschwindigkeiten in den betreffenden Medien umgekehrt proportional sein. Man sieht unmittelbar, daß auch für beliebig viele Prismen dasselbe gelten muß. Die Gesamtablenkung unterscheidet sich von der Summe des ersten Eintrittswinkels und letzten Austrittswinkels nur um den Winkel, den die erste mit der letzten (p^{ten}) Normalen macht

$$D = e_1 + b_p + \text{const}$$

Bei Veränderung von e_1 ändert sich auch b_p , aber die Konstante bleibt dieselbe. Daraus folgt, daß die Gesamtablenkung D für verschiedene Eintrittswinkel nur dann ein Maximum oder Minimum haben kann, wenn

$$\frac{dD}{de_1} = 1 + \frac{db_p}{de_1} = 0, \quad \text{d. h.} \quad \frac{db_p}{de_1} = -1$$

ist, oder in Worten, wenn bei Drehung des einfallenden Strahles der letzte Austrittswinkel sich ebenso schnell, aber im entgegengesetzten Sinne ändert wie der erste Eintrittswinkel.

Um diesen Eintrittswinkel zu berechnen, muß b_p als Funktion von e_1 dargestellt werden. Das geschieht durch die Kette von Gleichungen

$$\frac{\sin e_1}{v_1} = \frac{\sin b_1}{v_2},$$

$$\frac{\sin e_2}{v_2} = \frac{\sin b_2}{v_3},$$

$$\frac{\sin e_p}{v_p} = \frac{\sin b_p}{v_{p+1}},$$

wobei in der Regel $v_{p+1} = v_1$ sein wird, wenn der Strahl nach dem Durchgang durch die Prismen wieder in das erste Medium eintritt. Bei Veränderung von e_1 bleiben die Summen $b_1 + e_2, b_2 + e_3, \dots, b_{p-1} + e_p$ unverändert. Denn das sind die Winkel zwischen den Richtungen aufeinanderfolgender Normalen oder, was dasselbe ist, zwischen aufeinanderfolgenden brechenden Flächen. Wir haben daher

$$\frac{de_k}{db_{k-1}} = -1$$

Nun ist

$$\frac{db_k}{de_k} = \frac{v_{k+1}}{v_k} \frac{\cos e_k}{\cos b_k} = - \frac{db_k}{db_{k-1}} \quad (k = 2 \quad p)$$

Mithin

$$\frac{db_p}{de_1} = \prod_{k=2}^p \frac{db_k}{db_{k-1}} \quad \frac{db_1}{de_1} = (-1)^{p-1} \frac{v_{p+1}}{v_1} \prod_{k=1}^p \frac{\cos e_k}{\cos b_k}$$

Da jedem Prisma zwei brechende Flächen entsprechen, so ist p gerade, und daher ergibt sich für ein Maximum oder Minimum der Gesamtablenkung die Gleichung

$$\frac{v_{p+1}}{v_1} \prod_{k=1}^p \frac{\cos e_k}{\cos b_k} = 1$$

oder für den Fall, wo $v_{p+1} = v_1$,

$$\prod_{k=1}^p \frac{\cos e_k}{\cos b_k} = 1$$

Die Berechnung des gesuchten Eintrittswinkels kann in der Weise geschehen, daß man zunächst durch Zeichnung für eine Reihe von Eintrittswinkeln e_1 die Gesamtablenkung D so genau, wie die Zeichnung es erlaubt, konstruiert. Hat man so einen Winkel gefunden, wo D ein Minimum hat, so dient der betreffende

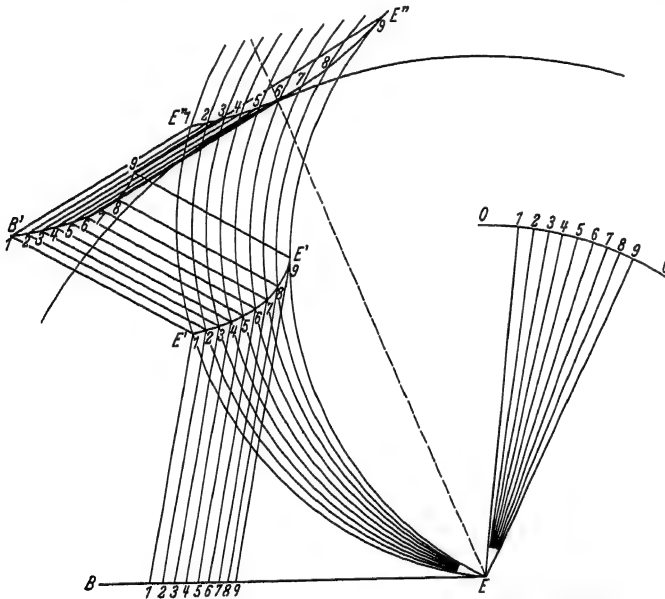


Abb 10 Minimum der Ablenkung, Fall zweier Prismen

Weit von e_1 , da er noch nicht die erforderliche Genauigkeit haben wird, als erste Annäherung, mit der man nun den Wert von

$$\prod_{k=1}^p \frac{\cos e_k}{\cos b_k}$$

berechnet. Die Abweichung dieses Wertes von 1 liefert dann in der bekannten Weise die Verbesserung des Näherungswertes von e_1 . Die Zeichnung läßt sich

für eine größere Anzahl von Einfallswinkeln sehr rasch durchführen. Man hält dabei den Punkt E und die Gerade EB fest, ändert dagegen die Punkte O , B , E' usw in der Art, daß die Längen OE , OB , OE' usw dieselben bleiben. Die Richtungen der Geraden BE' , $E'B'$ usw bleiben ebenfalls dieselben. Die verschiedenen Punkte O liegen also auf einem Kreisbogen um E vom Radius $1/r_1$. Die Punkte B werden dann gefunden, indem man mit dem Radius $1/r_2$ Kreisbogen um die Punkte O beschreibt und sie mit der Geraden EB schneidet. Durch die Reihe der Punkte B werden dann Parallelen in Richtung der zweiten Normale gezogen. Alsdann werden mit dem Radius $1/r_3$ um die Punkte O Kreisbogen geschlagen, von denen jeder mit der ihm entsprechenden Parallelen zum Schnitt gebracht wird usw. Die Gesamtablenkungen werden durch Kreisbogen dargestellt um die Punkte O , die alle von E ausgehen und den gleichen Radius besitzen. Die Größen der Ablenkungen können daher durch Kreisbogen, die um E geschlagen werden, miteinander verglichen werden. In Abb 10 ist die Konstruktion für den Fall von zwei Prismen ausgeführt.

14 Astigmatismus Fällt ein Bündel paralleler Lichtstrahlen gleicher Farbe auf eine ebene Trennungsfläche zweier optisch verschiedener Medien, so sind, wie wir gesehen haben, die gebrochenen Strahlen wieder einander parallel. Auch bei einer beliebigen Anzahl eben begrenzter, aufeinanderfolgender Medien muß also das in das letzte Medium tretende Bündel ebenfalls aus parallelen Lichtstrahlen bestehen oder, anders ausgedrückt, eine ebene Welle bleibt auch nach beliebig vielen Brechungen an ebenen Trennungsflächen homogener Medien eine ebene Welle.

Anders ist es, wenn die Lichtstrahlen von einem im Endlichen liegenden Punkte ausgehen oder, was dasselbe ist, wenn es sich um eine kugelförmige Welle handelt. Sie wird im allgemeinen nicht als Kugelwelle im letzten Medium heraus-treten, die austretenden Lichtstrahlen werden sich nicht in einem Punkt schneiden, ein homozentrisches Strahlenbündel wird nach der Brechung ein nichthomozentrisches sein.

Von einem Punkte A in einem Medium von der Lichtgeschwindigkeit v_1 falle ein Lichtstrahl auf die ebene Begrenzung eines zweiten Mediums von der

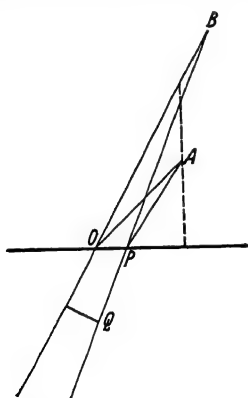


Abb 11 Der Astigmatismus bei der Brechung an einer ebenen Fläche

Lichtgeschwindigkeit v_2 . Die Grenzfläche machen wir zur x, y -Ebene eines rechtwinkligen Koordinatensystems, dessen Anfangspunkt O wir in den Punkt legen, in dem der Strahl die Ebene trifft. Die x, z -Ebene legen wir durch den Punkt A . Wir wollen zunächst nur die Strahlen betrachten, die in der x, z -Ebene liegen und dem Strahl AO benachbart sind. Sie werden in dieser Ebene gebrochen. Der Weg eines benachbarten, bei der Abszisse x die Grenzfläche treffenden Strahles AP , soweit er im ersten Medium liegt, ist

$$\sqrt{(x_a - x)^2} + z_a^2 = \sqrt{r_a^2 - 2x_a x} + z_a^2,$$

wo $r_a = OA$ gesetzt ist, oder nach Potenzen von x entwickelt

$$\overline{AP} = r_a - \frac{x_a}{r_a} x + \frac{1}{2} \frac{1}{r_a} \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right) x^2 +$$

Die Strahlen AP dringen mit veränderter Richtung in das zweite Medium ein. Die Lichtwelle, deren Normalen sie sind, wird in der x, z -Ebene durch einen Kreisbogen angenähert, der seinen Mittelpunkt in einem Punkte B des ersten Mediums haben wird (Abb 11). Die Bedingung für die

Lage von B ist die, daß die von A ausgehende Lichtwelle zu gleicher Zeit an den verschiedenen Punkten des Kreisbogens eintrifft. Ist also PQ der Weg des gebrochenen Strahles bis zu dem Kreisbogen, so muß

$$\frac{AP}{v_1} + \frac{PQ}{v_2}$$

für die verschiedenen Lagen von P langs der brechenden Fläche möglichst konstant sein. Da nun $PQ = BQ - BP$ und BQ auf dem Kreisbogen immer denselben Wert hat, so muß auch

$$\frac{AP}{v_1} - \frac{BP}{v_2}$$

konstant sein

Die Entwicklung nach Potenzen von x liefert für diese Größe

$$\frac{r_a}{v_1} - \frac{r_b}{v_2} - \left(\frac{r_a}{v_1} - \frac{r_b}{v_2} \right) x + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{r_a v_1} \left(1 - \frac{r_a^2}{r_b^2} \right) - \frac{1}{r_b v_2} \left(1 - \frac{r_b^2}{r_a^2} \right) \right] x^2 +$$

Soll dies für hinreichend kleine Werte von x einen von x möglichst unabhängigen Wert haben, so müssen die Glieder niedrigster Ordnung in x so weit wie möglich zum Verschwinden gebracht werden. Das Glied erster Ordnung liefert die Bedingung

$$\frac{r_a}{v_1} - \frac{r_b}{v_2} = 0 \quad \text{oder} \quad \frac{\sin e}{v_1} = \frac{\sin b}{v_2},$$

das ist das Brechungsgesetz. Das Glied zweiter Ordnung liefert

$$\frac{\cos^2 e}{r_a v_1} = \frac{\cos^2 b}{r_b v_2}$$

Daraus bestimmt sich die Lage des Punktes B . Die erste Gleichung liefert durch den Winkel b die Richtung von OB , und die zweite Gleichung bestimmt die Entfernung

$$OB = r_b = \frac{v_1}{v_2} r_a \frac{\cos^2 b}{\cos^2 e}$$

Was die Lage der Strahlen außerhalb der x, z Ebene betrifft, so ist nur zu beachten, daß alles symmetrisch ist um eine durch A senkrecht zur brechenden Fläche gelegte Achse. Wir erhalten alle übrigen gebrochenen Strahlen, wenn wir die in der x, z -Ebene konstruierten, die angenähert durch B laufen, um diese Achse drehen. Da sie selbst die Achse schneiden, so tun das also auch alle übrigen Strahlen.

Der Punkt B liegt dagegen nicht auf der Achse und wird daher bei der Rotation einen Kreisbogen beschreiben. Der Punkt, wo OB die Achse schneidet, liegt im Abstand

$$r_b = r_a \frac{\sin e}{\sin b} = \frac{v_1}{v_2} r_a$$

von O . Ist, wie in Abb. 11 angenommen, $v_2 < v_1$, so ist $e > b$, also $\cos^2 e < \cos^2 b$, mithin $OB > \frac{v_1}{v_2} r_a$. Von den beiden Brennpunkten des gebrochenen Strahlenbündels liegt also die zur Einfallsebene senkrechte weiter zurück als die in der Einfallsebene.

Wenn dagegen $v_2 > v_1$ und damit $e < b$ und $\cos^2 e > \cos^2 b$, so wird $OB < \frac{v_1}{v_2} r_a$. Der Punkt B liegt dann von O aus diessits der Achse, und die zur Einfallsebene senkrechte Brennpunktlinie des gebrochenen Strahlenbündels liegt nicht so weit zurück wie die in die Einfallsebene fallende. Der Astigmatismus des gebrochenen Lichtbündels kann durch den Abstand

$$\frac{v_1}{v_2} r_a \left(\frac{\cos^2 b}{\cos^2 e} - 1 \right)$$

der beiden Brennpunkten gemessen werden, wenn wir ihn in dem einen Falle positiv, im anderen Falle negativ rechnen

15 Winkeleränderung der Strahlen infolge der Brechung Betrachten wir zwei von A in der Einfallsebene ausgehende Strahlen, die den Winkel $d\omega$ miteinander bilden, so ist $\frac{r_a d\omega}{\cos e}$ der Abstand der Punkte, in denen sie die brechende Fläche treffen. Betrachten wir andererseits die beiden entsprechenden gebrochenen Strahlen, die den Winkel $d\omega'$ miteinander bilden, so wird derselbe Abstand ausgedrückt durch

$$\frac{r_b d\omega'}{\cos b}$$

Mithin ergibt sich für das Winkelverhältnis $d\omega'/d\omega$, das auch Winkelvergrößerung genannt wird, der Wert

$$\frac{d\omega'}{d\omega} = \frac{r_a}{r_b} \frac{\cos b}{\cos e} = \frac{v_2}{v_1} \frac{\cos e}{\cos b}$$

Zwei von A ausgehende, in der durch OA senkrecht zur Einfallsebene gelegten Ebene verlaufende Strahlen mögen auch den Winkel $d\omega$ miteinander bilden. Dann ist $r_a d\omega$ der Abstand der Punkte, in denen sie die brechende Fläche treffen. Ist nun $d\omega''$ der Winkel zwischen den entsprechenden gebrochenen Strahlen, so ist derselbe Abstand gleich $r_b d\omega''$, d. h. gleich $\frac{v_1}{v_2} r_a d\omega''$, mithin

$$\frac{d\omega''}{d\omega} = \frac{v_2}{v_1}$$

Das gebrochene Strahlenbündel hat also in den beiden aufeinander senkrechten Ebenen die voneinander verschiedenen Winkelvergrößerungen

$$\frac{d\omega'}{d\omega} = \frac{v_2}{v_1} \frac{\cos e}{\cos b} \quad \text{und} \quad \frac{d\omega''}{d\omega} = \frac{v_2}{v_1}$$

16 Astigmatismus bei mehreren Brechungen Es möge nun berechnet werden, wie sich der Astigmatismus des Strahlenbündels ändert, wenn es auf weitere ebene brechende Flächen trifft, die wir aber alle parallel einer brechenden Kante voraussetzen, auf der das Strahlenbündel senkrecht steht. Die Einfallsebenen sämtlicher Brechungen fallen dann zusammen, und wir können für sich die Brennpunkte betrachten, die auf der Einfallsebene senkrecht stehen, und ebenso für sich die Brennpunkte, die in der Einfallsebene liegen.

Was zunächst die ersteren betrifft, so spielt für die zweite brechende Fläche der Punkt B dieselbe Rolle, die A für die erste gespielt hat. Ist nun d_1 die Länge des gebrochenen Strahles zwischen der ersten und zweiten brechenden Fläche, so tritt bei der zweiten Brechung $r_b + d_1$ für r_a ein. Wir schreiben daher

$$r'_a = r_b + d_1,$$

und indem wir r'_b die Entfernung der Brennpunkte von der zweiten brechenden Fläche für das zweimal gebrochene Strahlenbündel nennen, erhalten wir analog der Gleichung für die erste Brechung

$$r_b = \frac{v_1}{v_2} r'_a \frac{\cos^2 b_1}{\cos^2 e_1}$$

jetzt

$$r'_b = \frac{v_2}{v_3} r'_a \frac{\cos^2 b_2}{\cos^2 e_2} \quad (r'_a = r_b + d_1)$$

und in gleicher Weise für die folgende Brechung

$$r''_b = \frac{v_3}{v_4} r'_a \frac{\cos^2 b_3}{\cos^2 e_3} \quad (r'_a = r_b + d_2)$$

usw

Die zugehörigen Winkelvergrößerungen sind für die einzelnen aufeinanderfolgenden Brechungen

$$\frac{v_2}{v_1} \frac{\cos \epsilon_1}{\cos b_1}, \quad \frac{v_3}{v_2} \frac{\cos \epsilon_2}{\cos b_2}, \quad ,$$

für das nach der p ten Brechung austretende Strahlenbündel also

$$\frac{v_{p+1}}{v_1} \prod_{k=1}^p \frac{\cos \epsilon_k}{\cos b_k}$$

Für die in der Einfallsebene liegende Brennpunktlinie fanden wir bei der ersten Brechung die Entfernung \bar{r}_b von der brechenden Fläche

$$r_b = \frac{v_1}{v_2} r_a$$

Analog finden wir für die zweite Brechung

$$\bar{r}'_b = \frac{v_2}{v_3} \bar{r}'_a, \quad (\bar{r}'_a = \bar{r}_b + d_1)$$

$$\bar{r}''_b = \frac{v_3}{v_4} \bar{r}''_a \quad (\bar{r}''_a = \bar{r}'_b + d_2)$$

usw

Die Winkelvergrößerungen sind

$$\frac{v_2}{v_1}, \quad \frac{v_3}{v_2},$$

und daher für das nach der p ten Brechung austretende Strahlenbündel

$$\frac{v_2}{v_1} \frac{v_3}{v_2} \dots \frac{v_{p+1}}{v_p} = \frac{v_{p+1}}{v_1}$$

Ist das letzte Medium dasselbe wie das erste, also $v_{p+1} = v_1$, so tritt mithin nur in der Einfallsebene die Winkelvergrößerung

$$\frac{v_{p+1}}{v_1} \prod_{k=1}^p \frac{\cos \epsilon_k}{\cos b_k}$$

ein. Auch hier erhalten wir den Wert 1 und damit keine Winkeländerung, wenn das Strahlenbündel im Minimum der Ablenkung liegt (vgl. Ziff 13)

Der Astigmatismus des nach der p ten Brechung austretenden Strahlenbündels wird durch den Abstand

$$r_b^{(p-1)} - \bar{r}_b^{(p-1)}$$

gemessen

Denken wir uns den Fall, daß die Strecken d zwischen den brechenden Flächen gegen die Entfernungen r vernachlässigt werden können, so wird

$$r_b^{(p-1)} = \frac{v_1}{v_{p+1}} r_a \prod_{k=1}^p \frac{\cos^2 b_k}{\cos^2 \epsilon_k}$$

und

$$r_b^{(p-1)} = \frac{v_1}{v_{p+1}} r_a$$

Der Abstand der beiden Brennpunktlinien des austretenden Strahlenbündels wird mithin

$$\frac{v_1}{v_{p+1}} r_a \left(\prod_{k=1}^p \frac{\cos^2 b_k}{\cos^2 \epsilon_k} - 1 \right)$$

Für das Minimum der Ablenkung fanden wir oben (Ziff 13) die Bedingung

$$\frac{v_{p+1}}{v_1} \prod_{k=1}^p \frac{\cos e_k}{\cos b_k} = \pm 1,$$

also

$$\prod_{k=1}^p \frac{\cos^2 b_k}{\cos^2 e_k} = \left(\frac{v_{p+1}}{v_1} \right)^2$$

Für diesen Fall ergibt sich also der Abstand der beiden Brennnlinien gleich

$$r_a \left(\frac{v_{p+1}}{v_1} - \frac{v_1}{v_{p+1}} \right)$$

und mithin gleich Null, wenn die Lichtgeschwindigkeit im letzten Medium gleich der im ersten Medium ist

Können die Wege d zwischen den brechenden Flächen gegen die Entfernungen r nicht vernachlässigt werden, so wird der Abstand der Brennnlinien des austretenden Strahlenbuschels von den Werten der d abhängen

Für den Fall von zwei Brechungen z B ist

$$r'_a = \frac{v_2}{v_1} \left(\frac{v_1}{v_2} \frac{\cos^2 b_1}{\cos^2 e_1} \frac{\cos^2 b_2}{\cos^2 e_2} r_a + \frac{\cos^2 b_2}{\cos^2 e_2} d \right),$$

$$\bar{r}'_a = \frac{v_2}{v_1} \left(\frac{v_1}{v_2} r_a + d \right)$$

und mithin der Abstand der Brennnlinien gleich

$$\frac{v_1}{v_1} \left(\frac{\cos^2 b_1}{\cos^2 e_1} \frac{\cos^2 b_2}{\cos^2 e_2} - 1 \right) r_a + \frac{v_2}{v_1} \left(\frac{\cos^2 b_2}{\cos^2 e_2} - 1 \right) d$$

Im Minimum der Ablenkung wird der Astigmatismus keineswegs verschwinden und kann für $v_1 = v_2$ auch nicht durch passende Wahl von r_a zum Verschwinden gebracht werden. Wenn indessen der Koeffizient von r_a nicht verschwindet, so läßt sich r_a so bestimmen, daß das Strahlenbündel stigmatisch wird. Fällt z B das Licht auf die erste Fläche senkrecht ein, so ist $e_1 = b_1 = 0$. Es wird der Astigmatismus also Null, wenn

$$v_1 r_a + v_2 d = 0,$$

d h das Bündel muß konvergierend auf die erste Fläche fallen mit dem Zentrum im Abstand $\frac{v_2}{v_1} d = -r_a$ hinter den Punkt, wo es die erste Fläche trifft

Auch bei beliebig vielen Brechungen wird der Ausdruck für den Abstand der Brennnlinien, wenn wir ihn als Funktion von r_a und der d -Werte ausdrücken, in r_a linear. Es gibt daher auf jedem eintretenden Strahl einen Punkt A von der Art, daß ein von A ausgehendes, unendlich schmales Strahlenbündel beim Austritt in das letzte Medium wieder stigmatisch ist

Wenn wir den einfallenden Strahl parallel mit sich senkrecht zur brechenden Kante verschieben, so daß alle Einfallswinkel und Brechungswinkel dieselben bleiben, so wird der Abstand der Brennnlinien des austretenden Buschels eine lineare Funktion von r_a und den sämtlichen d -Werten mit festen Koeffizienten. Nun sind aber offenbar die d -Werte lineare Funktionen der Parallelverschiebung, also ist auch der Wert von r_a , der den Astigmatismus zum Verschwinden bringt, eine lineare Funktion der Parallelverschiebung. Mithin liegen alle Punkte A auf einer Geraden. Da ferner auch $r_a^{(k-1)}$ eine lineare Funktion der Parallelverschiebung ist, so wird auch das Zentrum des austretenden stigmatischen Strahlenbündels sich auf einer Geraden verschieben

17 Gesichtswinkel eines durch Prismen betrachteten Spaltes Wir betrachten oben (Ziff 15) die Richtungsänderungen zweier von einer Lichtquelle A ausgehenden, senkrecht zur brechenden Kante verlaufenden Strahlen und das Verhältnis, in dem sich der kleine Winkel zwischen ihnen durch die Brechungen ändert. Wir können auch umgekehrt von einem Punkte eines austretenden Strahles ausgehen und einen benachbarten, durch denselben Punkt gehenden Strahl rückwärts durch die brechenden Medien verfolgen. Er wird im ersten Medium nicht durch den Punkt A gehen und mit dem durch A gehenden Strahl einen gewissen Winkel bilden. Das Verhältnis des Winkels im letzten Medium zu dem im ersten wird aber dasselbe sein, das oben für die Winkelvergrößerung berechnet und durch den Ausdruck

$$\frac{v_{p+1}}{v_1} \prod_{k=1}^p \frac{\cos e_k}{\cos b_k}$$

wiedergegeben wurde oder, wenn das letzte Medium mit dem ersten identisch ist, durch

$$\prod_{k=1}^p \frac{\cos e_k}{\cos b_k}$$

Liegt A hinreichend weit von den brechenden Flächen entfernt, so können wir diesen Wert auch auffassen als die Änderung, welche die Winkelbreite eines zur brechenden Kante parallelen Spaltes erfährt, wenn er durch die brechenden Medien hindurch betrachtet wird. Im Minimum der Ablenkung erscheint er gleich breit, für andere Strahlengänge wird er je nach den größeren oder kleineren Werten von

$$\prod \frac{\cos e_k}{\cos b_k}$$

verbreitert oder verengert erscheinen. Durch ein Prisma betrachtet, wird z. B. bei streifendem Eintritt ($e_1 = 90^\circ$) das Spaltbild unendlich schmal, bei streifendem Austritt ($b_2 = 90^\circ$) unendlich verbreitert erscheinen.

18 Zusammenhang von Querschnitt und Richtungsunterschied eines Strahlenbündels bei Brechungen Die Gesetze, nach denen sich das Strahlenbündel beim Durchgang durch die brechenden Flächen ändert, können in einer anderen Form ausgedrückt werden, indem wir nicht einen leuchtenden Punkt A , sondern eine kleine quer zum Strahl gelegene Strecke dq_A als Lichtquelle betrachten. Wir nehmen dq_A zunächst in der Einfallsebene an. Durch die erste Brechung wird dann für das gebrochene Strahlenbündel die entsprechende Querstrecke dq_B die Größe haben, die sich durch die Winkelvergrößerung

$$\frac{d\omega_B}{d\omega_1} = \frac{v_2 \cos e_1}{v_1 \cos b_1}$$

ergibt, also

$$\frac{dq_B/r_B}{dq_A/r_A} = \frac{v_2 \cos e_1}{v_1 \cos b_1}$$

oder

$$\frac{dq_B \cos b_1}{v_2 r_B} = \frac{dq_A \cos e_1}{v_1 r_A}$$

Da nun

$$\frac{r_B d\omega_B}{\cos b_1} = \frac{r_A d\omega_A}{\cos e_1},$$

so folgt durch Multiplikation der rechten und linken Seiten der letzten beiden Gleichungen

$$\frac{dq_B d\omega_B}{v_2} = \frac{dq_A d\omega_A}{v_1}$$

Wenn man also den Querschnitt des Strahlenbündels in dem Punkte der zur Einfallsebene senkrechten Brennnlinie mit seinem Öffnungswinkel multipliziert und durch die Lichtgeschwindigkeit dividiert, so bleibt dieser Wert bei der Brechung derselbe. Folglich muß nach der p ten Brechung der Querschnitt dq und die Öffnung $d\omega$ der Gleichung genügen

$$\frac{dq \, d\omega}{v_{p+1}} = \frac{dq_1 \, d\omega_1}{v_1}$$

und für $v_{p+1} = v_1$

$$dq \, d\omega = dq_A \, d\omega_A$$

Betrachten wir andererseits die von A ausgehenden Strahlen in einer zur Einfallsebene senkrechten Ebene und denken uns auch hier an Stelle des Punktes A eine kleine Strecke $d\bar{q}_A$ senkrecht zur Einfallsebene. Bei der Brechung geht dann A in B und $d\bar{q}_A$ in $d\bar{q}_B$ über, wobei $d\bar{q}_B = d\bar{q}_A$.

Der Öffnungswinkel $d\bar{\omega}_A$ geht in $d\bar{\omega}_B$ über, wobei, wie oben gezeigt,

$$\frac{d\bar{\omega}_A}{v_1} = \frac{d\bar{\omega}_B}{v_2}$$

Wir haben also auch hier

$$\frac{d\bar{q}_A \, d\bar{\omega}_A}{v_1} = \frac{d\bar{q}_B \, d\bar{\omega}_B}{v_2}$$

und, da für jede Brechung das Analoge gilt, auch für das nach der p ten Brechung austretende Strahlenbündel

$$\frac{d\bar{q} \, d\bar{\omega}}{v_{p+1}} = \frac{d\bar{q}_A \, d\bar{\omega}_A}{v_1}$$

und für $v_{p+1} = v_1$

$$d\bar{q} \, d\bar{\omega} = d\bar{q}_A \, d\bar{\omega}_A$$

Wir können nun beides zusammenfassen, wenn wir als Lichtquelle statt A ein kleines Rechteck $dq_A \, d\bar{q}_A$ betrachten.

Bezeichnen wir die Fläche dieses Rechtecks mit dQ_A und die Öffnung $d\omega_A \, d\bar{\omega}_A$ des ganzen Strahlenbündels mit $d\Omega_A$, so erhalten wir nach der p ten Brechung, vorausgesetzt, daß wir den Astigmatismus vernachlässigen dürfen, den Querschnitt dQ und die Öffnung $d\Omega$, die der Gleichung genügen müssen

$$\frac{dQ \, d\Omega}{v^2} = \frac{dQ_A \, d\Omega_A}{v_1^2}$$

oder für $v = v_1$

$$dQ \, d\Omega = dQ_A \, d\Omega_A$$

Auf die Unveränderlichkeit von

$$\frac{dQ \, d\Omega}{v^2}$$

bei der Brechung hatten wir auch direkt aus einer Energiebetrachtung schließen können.

19 Vermeidung des Astigmatismus bei Brechung an ebenen Flächen Der Astigmatismus bei der Brechung an ebenen Flächen wird ganz und gar vermieden, wenn man es mit ebenen Lichtwellen zu tun hat. Aus diesem Grunde wird bei spektroskopischen Prismenapparaten vor die brechenden Flächen eine Linse gesetzt, welche die vom Spalt ausgehenden Lichtwellen in ebene Wellen verwandelt oder, wie man auch sagen kann, welche den Spalt ins Unendliche verlegt. Die austretenden Lichtwellen sind dann ebenfalls eben, und eine hinter den Prismen angebrachte Linse entwirft ein Bild des Spaltes in der von ihm ausgehenden Farbe.

20 Die Farbenzerstreuung Die Brechung des Lichtes kann nun dazu dienen, es in seine verschiedenen Farben zu zerlegen dadurch, daß in demselben Medium die verschiedenen Farben verschiedene Lichtgeschwindigkeiten haben.

An der Grenze zweier Medien, in denen das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten $n = v_1/v_2$ für zwei Farben verschiedene Werte hat, werden die beiden Farben bei gleichem Einfallswinkel voneinander verschiedene Brechungswinkel haben. Bei weiteren Brechungen kann durch passende Anordnung der Richtungsunterschied der beiden Farben noch vergrößert werden, mit dem sie dann in das letzte Medium austreten, das in der Regel mit dem ersten übereinstimmt. In Abb 12 ist für ein Prisma der Gang von drei Strahlen mit dem Brechungskoeffizienten $n = 1,4, 1,5, 1,6$ konstruiert, die in derselben Richtung auf das Prisma auffallen. Die drei Richtungen der austretenden Strahlen ergeben sich durch die Schnittpunkte E_1, E_2, E_3 der drei Normalen B_1E_1, B_2E_2, B_3E_3 mit dem um O geschlagenen Kreise. Die Punkte B_1, B_2, B_3 ergeben sich durch die Schnittpunkte der drei Kreisbögen mit den Radien $OB_1 = 1,4 OE, OB_2 = 1,5 OE, OB_3 = 1,6 OE$ mit der Normalen EB . Die Farbenzerstreuung wird also einmal dadurch bewirkt, daß die Punkte B_1, B_2, B_3 auseinanderfallen, weil ihnen verschiedene Werte von n entsprechen, zweitens aber auch dadurch, daß die Punkte E_1, E_2, E_3 noch weiter auseinanderrücken. Mit wachsendem n rücken die Punkte E immer stärker auseinander.

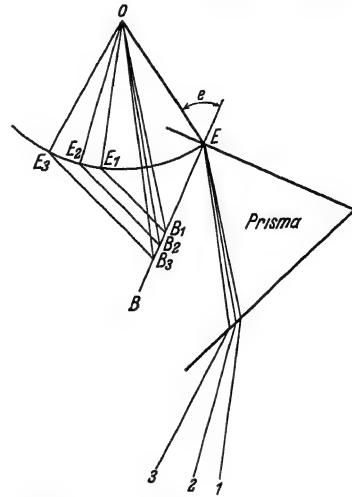


Abb 12 Die Farbenzerstreuung durch ein Prisma

21 Zusammenhang der Farbenzerstreuung mit der Dispersion eines Mediums

Die Farbenzerstreuung wird durch den Wert

$$\frac{dD}{d\lambda}$$

ausgedrückt, wo D die Ablenkung und λ die Wellenlänge der betrachteten Farbe bezeichnet. Sie läßt sich aus der Dispersion

$$\frac{dn}{d\lambda}$$

berechnen, d. h. aus der Änderung des Brechungskoeffizienten pro Einheit der Wellenlängenänderung.

Aus den Gleichungen

$$\sin e = n \sin b_1, \quad b_1 + e_2 = \alpha$$

$$n \sin e_2 = \sin b_2$$

ergibt sich durch Differentiation

$$0 = \frac{dn}{d\lambda} \sin b_1 + n \cos b_1 \frac{db_1}{d\lambda},$$

$$\frac{dn}{d\lambda} \sin e_2 - n \cos e_2 \frac{db_1}{d\lambda} = \cos b_2 \frac{db_2}{d\lambda},$$

mithin, da $\frac{dD}{d\lambda} = \frac{db_2}{d\lambda}$,

$$\frac{dD}{d\lambda} = \frac{\sin \alpha}{\cos b_1 \cos b_2} \frac{dn}{d\lambda}$$

Dieselbe Beziehung läßt sich auch aus der Abb 12 ablesen. Denn $\frac{dn}{\cos b_1}$ ist die Verschiebung des Punktes B_1 , die der Änderung dn von OB_1 entspricht (OE gleich 1 angenommen), $\frac{\sin \alpha}{\cos b_1}$ ist die Projektion dieser Strecke senkrecht zu B_1E_1 , und $\frac{\sin \alpha}{\cos b_1 \cos b_2}$ ist die entsprechende Verschiebung von E_1 .

22 Minimum der Farbenzerstreuung Die Farbenzerstreuung wird unendlich groß, wenn der Strahl streifend austritt, weil dann $\cos b_2$ verschwindet. Für gleiche Werte von α , b_1 , b_2 ist die Farbenzerstreuung bei Prismen aus verschiedenem Material proportional der Dispersion $dn/d\lambda$.

Bei gleichen Werten von α und $dn/d\lambda$ ist die Farbenzerstreuung um so größer, je kleiner

$$\cos b_1 \cos b_2$$

Sie kann also wohl unendlich groß, aber nicht Null werden. Ihr kleinster Wert entspricht dem größten Wert dieses Kosinusproduktes. Betrachten wir dieses als Funktion des zweiten Einfallswinkels e_2 , so sehen wir, daß der Differentialquotient nach e_2

$$\sin b_1 \cos b_2 - \cos b_1 \sin b_2 \frac{db_2}{de_2}$$

für $e_2 = 0$ gleich $\sin b_1$, also positiv, und für $e_2 = \alpha$, und daher $b_1 = 0$ gleich $-\sin b_2 \frac{db_2}{de_2}$, also negativ ist. Bei $e_2 = 0$ steigt also der Wert von

$$\cos b_1 \cos b_2,$$

und bei $e_2 = \alpha$ nimmt er ab. Er muß mithin zwischen beiden ein Maximum besitzen. Wenn diesen Winkeln ein reeller Einfallswinkel entspricht, so gibt das ein Minimum der Farbenzerstreuung. Der Wert von e_2 wird errechnet, indem man den Differentialquotienten gleich Null setzt. Da

$$n \sin e_2 = \sin b_2 \quad \text{und daher} \quad \frac{n \cos e_2}{\cos b_2} = \frac{db_2}{de_2},$$

so erhalten wir

$$\sin b_1 \cos b_2 = \frac{\cos b_1 n^2 \sin e_2 \cos e_2}{\cos b_2}$$

oder

$$n^2 \operatorname{ctg} b_1 = \frac{\cos^2 b_2}{\sin e_2 \cos e_2} - \frac{1 - n^2 \sin^2 e_2}{\sin e_2 \cos e_2} = \operatorname{ctg} e_2 - (n^2 - 1) \operatorname{tg} e_2$$

Die rechte Seite ist für $e_2 = 0$ unendlich und nimmt mit wachsendem e_2 dauernd ab. Die linke Seite dagegen nimmt von $e_2 = 0$ ($b_1 = \alpha$) bis $e_2 = \alpha$ dauernd zu und wird für $e_2 = \alpha$ ($b_1 = 0$) unendlich. Es gibt daher zwischen 0 und α einen und nur einen Wert von e_2 , wo beide Seiten einander gleich sind. Er wird für irgendeinen gegebenen Fall sehr rasch durch die regula falsi ermittelt. Für kleine Werte von b_1 und e_2 , wie sie bei kleinen brechenden Winkeln vorkommen, ist genähert $\operatorname{ctg} b_1 = 1/b_1$ bis auf eine Größe von der Ordnung b_1 , und ebenso ist $\operatorname{ctg} e_2 - (n^2 - 1) \operatorname{tg} e_2$ gleich $1/e_2$ bis auf eine Größe von der Ordnung e_2 . Daher ist mit gleicher Annäherung

$$n^2/b_1 = 1/e_2 \quad \text{oder} \quad b_1 = n^2 e_2$$

Wächst e_2 über α hinaus, so wird b_1 negativ und damit auch die linke Seite der Gleichung. Die rechte Seite dagegen bleibt positiv. Hier kann also keine Wurzel mehr vorkommen. Der Wert von e_2 zwischen 0 und α , für den die Gleichung erfüllt ist, kann einen Wert von b_1 ergeben, für den $n \sin b_1$ größer als 1 ist. Dann entspricht ihm kein Strahlengang. Die kleinste Farbenzerstreuung findet dann bei streifender Inzidenz

$$n \sin b_1 = 1$$

statt

Im Minimum der Ablenkung, wo $b_1 = \alpha/2$, $\sin b_2 = n \sin \alpha/2$, wird

$$\cos b_1 \cos b_2 = \cos \alpha/2 \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha/2}$$

und mithin

$$\frac{dD}{dn} = \frac{\sin \alpha}{\cos b_1 \cos b_2} = \frac{2 \sin \alpha/2}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha/2}}$$

oder, wenn wir $n \sin \alpha / 2 = \sin e_1$ einführen,

$$\frac{dD}{dn} = \frac{2}{n} \operatorname{tg} e \quad (D = 2e_1 - \alpha)$$

Für denjenigen Einfallswinkel, für den das reflektierte Licht vollständig polarisiert ist, ist $\operatorname{tg} e = n$. Hier muß also immer

$$\frac{dD}{dn} = 2$$

sein

23 Farbenzerstreuung bei mehreren Brechungen Um auch für eine beliebige Anzahl von Brechungen die Farbenzerstreuung zu verfolgen, schreiben wir in den Brechungsgleichungen n_0, n_1, n_2, \dots an Stelle der reziproken Geschwindigkeiten $1/v_1, 1/v_2, 1/v_3, \dots$, so daß sie lauten

$$\begin{aligned} n_0 \sin e_1 &= n_1 \sin b_1, \\ n_1 \sin e_2 &= n_2 \sin b_2, & e_2 + b_1 &= \alpha_1, \\ n_2 \sin e_3 &= n_3 \sin b_3, & e_3 + b_2 &= \alpha_2 \end{aligned}$$

Wir betrachten nun den Einfallswinkel e_1 und die reziproken Lichtgeschwindigkeiten als Funktionen der Wellenlänge λ und haben zu untersuchen, wie dann der letzte Brechungswinkel b_p sich mit der Wellenlänge ändert. $de_1/d\lambda$ drückt die Farbenzerstreuung des einfallenden Lichtes, $db_p/d\lambda$ die des austretenden Lichtes aus. Durch Differentiation ergibt sich

$$n_0 \cos e_1 de_1 + \sin e_1 dn_0 = n_1 \cos b_1 db_1 + \sin b_1 dn_1,$$

$$n_1 \cos e_2 de_2 + \sin e_2 dn_1 = n_2 \cos b_2 db_2 + \sin b_2 dn_2, \quad de_2 = -db_1,$$

$$n_{p-1} \cos e_p de_p + \sin e_p dn_{p-1} = n_p \cos b_p db_p + \sin b_p dn_p, \quad de_p = -db_{p-1}.$$

Wir multiplizieren die letzte Gleichung mit

$$K_p = \frac{1}{\cos b_p},$$

die vorletzte mit

$$K_{p-1} = -\frac{\cos e_p}{\cos b_{p-1}} K_p$$

und addieren beide. Dadurch fallen die Glieder mit de_p und db_{p-1} gegeneinander fort, und dn_{p-1} wird, auf die rechte Seite gebracht, den Koeffizienten erhalten

$$K_{p-1} \sin b_{p-1} - K_p \sin e_p = -\frac{K_p \sin \alpha_{p-1}}{\cos b_{p-1}}$$

Ebenso multiplizieren wir die drittletzte Gleichung mit

$$K_{p-2} = \frac{\cos e_{p-1}}{\cos b_{p-2}} K_{p-1}$$

und addieren sie hinzu. Dadurch fallen die Glieder mit de_{p-1} und db_{p-2} gegeneinander fort, und dn_{p-2} erhält, auf die rechte Seite gebracht, den Koeffizienten

$$-K_{p-1} \frac{\sin \alpha_{p-2}}{\cos b_{p-2}}$$

usf., so daß sich schließlich ergibt

$$\begin{aligned} K_1(n_0 \cos e_1 de_1 + \sin e_1 dn_0) &= -K_2 \frac{\sin \alpha_1}{\cos b_1} dn_1 - \dots - K_p \frac{\sin \alpha_{p-1}}{\cos b_{p-1}} dn_{p-1} \\ &+ n_p db_p + \operatorname{tg} b_p dn_p \end{aligned}$$

oder, wenn wir $n_0 = n_p = 1$ annehmen, unabhängig von der Wellenlänge

$$K_1 \cos e_1 d e_1 + K_2 \frac{\sin \alpha_1}{\cos b_1} d n_1 + \dots + K_p \frac{\sin \alpha_{p-1}}{\cos b_{p-1}} d n_{p-1} = d b_p$$

Dabei ist

$$K_p = \frac{1}{\cos b_p}, \quad K_{p-1} = -\frac{\cos e_p}{\cos b_p \cos b_{p-1}}, \quad K_{p-2} = \frac{\cos e_p \cos e_{p-1}}{\cos b_p \cos b_{p-1} \cos b_{p-2}},$$

$$K_1 = (-1)^{p-1} \frac{\cos e_p \cos e_{p-1} \dots \cos e_2}{\cos b_p \cos b_{p-1} \dots \cos b_2 \cos b_1}$$

Die Glieder der Formel für db_p gewinnen eine einfache physikalische Bedeutung, wenn wir das oben (Ziff 13) abgeleitete Winkeländerungsverhältnis einführen. Das Verhältnis, in dem ein kleiner Winkel durch die letzten q Brechungen geändert wird, wurde oben (Ziff 16) gleich

$$\frac{n_{p-q} \cos e_p \cos e_{p-1} \dots \cos e_{p-q+1}}{n_p \cos b_p \cos b_{p-1} \dots \cos b_{p-q+1}}$$

gefunden

Bezeichnen wir dies mit W_q , so ist

$$\cos b_p K_p = 1, \quad \cos b_{p-1} K_{p-1} = -\frac{W_1}{n_{p-1}}, \quad \cos b_{p-2} K_{p-2} = \frac{W_2}{n_{p-2}},$$

und somit

$$db_p = \frac{\sin \alpha_{p-1}}{\cos b_{p-1} \cos b_p} d n_{p-1} - \frac{W_1}{n_{p-1}} \frac{\sin \alpha_{p-2}}{\cos b_{p-2} \cos b_{p-1}} d n_{p-2} - \dots \pm \frac{W_{p-2}}{n_2} \frac{\sin \alpha_1}{\cos b_1 \cos b_2} d n_1 \mp W_p d e_1$$

$\frac{\sin \alpha_p}{\cos b_p \cos b_{p+1}} \frac{d n_p}{d \lambda}$ fanden wir oben (Ziff 21) gleich der Farbenzerstreuung eines Prismas vom brechenden Winkel α_p . Es setzt sich also die Farbenzerstreuung $\frac{db_p}{d \lambda}$, die durch die p Brechungen bewirkt wird, additiv aus den Zerstreungen durch die einzelnen zwischen je zwei brechenden Flächen gelegenen Prismen zusammen, wenn wir jede mit den Faktoren W/n multiplizieren.

Wenden wir die Formel auf den Fall an, wo wir es mit einer Reihe von Prismen in einem Medium zu tun haben, dessen Lichtgeschwindigkeit wir gleich 1 setzen können, so ist p gerade und $n_2 = n_4 = \dots = n_{p-1} = 1$ unabhängig von λ , und wir erhalten

$$db_p = \frac{\sin \alpha_{p-1}}{\cos b_{p-1} \cos b_p} d n_{p-1} + W_2 \frac{\sin \alpha_{p-3}}{\cos b_{p-3} \cos b_{p-2}} d n_{p-3} + \dots + W_{p-2} \frac{\sin \alpha_1}{\cos b_1 \cos b_2} d n_1 - W_p d e_1$$

Sind sämtliche Prismen im Minimum der Ablenkung, so sind die Größen W sämtlich 1, und wenn auch noch die Winkel bei jedem Prisma dieselben sind

$$db_p = \frac{p}{2} \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha/2 \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha/2}} d n$$

24 Die Krümmung der Spektrallinien im Prismenspektrum bei Anwendung mehrerer Prismen Diese und die obige Formel erlauben nun auch die Krümmung der Spektrallinien in einem Spektralapparat zu berechnen, bei dem paralleles Licht durch einen Prismensatz läuft, dessen brechende Kanten alle parallel sind. Die Richtungsablenkung der Projektion eines Strahles auf eine zur brechenden Kante senkrechte Ebene gegen den in der Ebene verlaufenden Strahl ist, wie in Ziff 11 gezeigt, geradeso zu berechnen, als ob für die Projektion die Brechungsexponenten andere geworden wären und es sich auch um einen Strahl handelte,

der in der Projektionsebene verlief. Um db_k zu berechnen, haben wir also nur für dn_α einzusetzen

$$\sqrt{n_\alpha^2 + (n_\alpha^2 - 1) \operatorname{tg}^2 \varepsilon} - n_\alpha,$$

da für kleine Werte von ε

$$\frac{1}{2} \frac{n_\alpha^2 - 1}{n_\alpha} \varepsilon^2$$

Aus dem so gewonnenen Werte von db_k wird die Krümmung der Spektrallinie in derselben Weise wie in Ziff 13 berechnet

b) Theorie der Gitter und Interferenzspektroskope

25 Interferenz von Lichtbündeln gleicher Phasendifferenz Die zweite Methode, Licht in seine farbigen Bestandteile zu zerlegen, besteht darin, daß man das von einem Punkte ausgehende Licht in eine Anzahl von Lichtbündeln teilt, diese verschiedenen Lichtbündel durch Reflexion oder durch Brechung oder durch beides verschiedene Wege gehen läßt und sie dann wieder vereinigt. Handelt es sich um eine Reihe von n Lichtbündeln, und sind die n Wege, die sie zurückzulegen haben so abgemessen, daß die Zeit τ zwischen dem Eintreffen von je zwei in der Reihe aufeinanderfolgenden Lichtbündeln, die zu gleicher Zeit von der Lichtquelle ausgehen, dieselbe ist, so wird eine namhafte Lichtbewegung im Endpunkte der Bahn nur für solche Lichtwellen entstehen können, die mit gleicher Phase dort eintreffen. Wir wollen dabei zunächst voraussetzen, daß für die n Lichtwege nur ein Medium in Betracht kommt, dessen Lichtgeschwindigkeit für alle Farben als gleich betrachtet werden kann. Damit die Phase die gleiche sei, müssen in der Zeit τ gerade eine ganze oder zwei ganze oder überhaupt eine ganze Anzahl Lichtschwingungen vor sich gehen. Wenn also ν die Zahl der Lichtschwingungen in der Zeiteinheit ist, so muß $\nu\tau$ eine ganze positive oder negative Zahl sein. Ist das der Fall, so werden in der Tat alle Lichtwellen im Endpunkte der Bahn ihre Amplituden addieren. Für eine Schwingungszahl dagegen, für die $\nu\tau$ von einer ganzen Zahl um einen Bruchteil ε abweicht, wird die zweite Lichtwelle die erste nicht voll verstärken können. Für $\varepsilon = \pm \frac{1}{2}$ wird sie die erste im Endpunkte der Bahn sogar ganz aufheben und dafür an anderen Stellen des Raumes verstärken. Die Zusammensetzung der beiden Wellen läßt sich graphisch durch die Addition zweier Vektoren darstellen, die einen Winkel $2\pi\varepsilon$ miteinander bilden und deren Längen den Amplituden der beiden Lichtbündel proportional sind. Ihre geometrische Summe stellt dann durch ihre Länge die Amplitude der resultierenden Lichtbewegung und durch ihre Richtung ihre Phase dar (Abb 13). Die dritte Lichtwelle ist durch einen Vektor darzustellen, der den Winkel $2\pi - 2\varepsilon$ mit dem ersten bildet, die vierte durch den Winkel $2\pi - 3\varepsilon$ usw. Ist ε so klein, daß selbst $2\pi(n-1)\varepsilon$ noch nicht größer ist als π , also der Phasenunterschied $(n-1)\varepsilon$ der ersten und letzten Welle noch nicht größer als $\frac{1}{2}$, so liegen alle n Vektoren auf einer Seite einer Geraden und werden im allgemeinen immer noch eine beträchtliche Resultante geben. Wird indessen $n\varepsilon$ gleich 1 und größer, so verteilen sich die Vektoren nach allen Richtungen, und ihre Resultante wird klein im Verhältnis zur Resultante in dem Falle $\varepsilon = 0$.

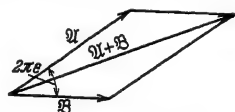


Abb 13 Zusammensetzung zweier Wellen

Ist n eine sehr große Zahl, so wird schon eine sehr kleine Phasendifferenz ε genügen, um die Intensität im Endpunkt der Bahn herunterzudrücken. Da die Schwingungszahlen

$$\nu = \frac{1}{\tau}, \quad \nu = \frac{2}{\tau} \quad \text{usw}$$

des Lichtes, dessen Intensität durch Interferenz nicht geschwächt ist, werden scharf definiert sein. Für $\nu = \frac{m}{\tau}$ genügt, wie wir eben gesehen haben, schon die Änderung $\Delta\nu = \frac{\varepsilon}{\tau}$, wo $\varepsilon n = 1$, um die Lichtbewegung stark herabzusetzen. Dann ist

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{1}{nm}$$

Durch die Anordnung der n Lichtwege ist auf diese Weise das Licht bestimmter Schwingungszahlen ausgesondert.

26 Die Kurve des Spektrums Wir denken uns nun die Anordnung der Lichtwege so getroffen, daß für andere Werte von τ andere n Lichtwege in einem anderen Punkt im Raume enden, in welchem sie eine namhafte Lichtbewegung für die neuen Schwingungszahlen

$$\frac{m}{\tau}$$

hervorrufen. Die Punkte im Raume bilden dann als Funktion von τ eine Kurve, auf der das betrachtete Licht nach seinen Schwingungszahlen in ein Spektrum zerlegt ist. Wir nennen sie die Kurve des Spektrums. Jedem Punkte des Spektrums entspricht ein Wert von τ , aber allerdings nicht nur eine Schwingungszahl ν , sondern eine Reihe von Schwingungszahlen, die sich wie die ganzen Zahlen zueinander verhalten. Wir nennen auf der Kurve des Spektrums das Licht der Schwingungszahlen

$$\nu = \pm \frac{1}{\tau}$$

das Spektrum erster Ordnung, das Licht der Schwingungszahlen

$$\nu = \pm \frac{m}{\tau}$$

das Spektrum m ter Ordnung.

Wenn wir die Werte von τ langs der Kurve kennen, so lassen sich die Schwingungszahlen der verschiedenen Ordnungen berechnen. Die Werte von τ ergeben sich durch die Messung der Lichtgeschwindigkeit und der Unterschiede der n Lichtwege.

Gesetzt, wir hatten es mit Licht einer Farbe zu tun, so würde dies in den verschiedenen Ordnungen an den verschiedenen Stellen des Spektrums erscheinen, in erster Ordnung an der Stelle $\tau_1 = 1/\nu$, in m ter Ordnung an der Stelle $\tau_m = m\tau_1$, so daß wieder m/τ_m denselben Wert $\nu = 1/\tau_1$ ergibt.

27 Spektrallinien In der Regel wird man die Lichtquelle nicht punktförmig machen, sondern man wird ihr Linienform geben, so daß auch die Punkte, in denen sich die Lichtwellen wieder vereinigen, zu Linien auseinandergezogen werden, die sich aber quer zum Spektrum erstrecken müssen, um die benachbarten Farben nicht durcheinanderzuwerfen. Das Spektrum wird dadurch aus einer Kurve zu einem Band auseinandergezogen.

In manchen Fällen läßt es sich nicht erreichen, daß ein Punkt der Lichtquelle durch die n Lichtwege punktförmig abgebildet wird. Die Abbildung wird dann astigmatisch, und das Spektrum wird aus der einen Brennnlinie des astigmatischen Strahlenbuschels bestehen. Auch in diesem Falle kann man der Lichtquelle eine linienförmige Ausdehnung geben, wenn man darauf achtet, daß die den verschiedenen Punkten der Lichtquelle entsprechenden Brennnlinien so gegeneinander verschoben sind, daß sie zusammen eine Linie bilden. Sie können nicht miteinander interferieren, weil ihnen verschiedene Punkte der Lichtquelle entsprechen, sondern ihre Intensitäten werden sich addieren, wo die Brennnlinien übereinanderfallen.

28 Feinheit der Aufspaltung Um eine große Feinheit der Aufspaltung zu erhalten, muß man, wie wir oben sahen, dem Produkte nm einen hinreichend großen Wert geben. Das kann für eine gegebene Schwingungszahl $\nu = m/\tau$ und einen gegebenen Wegunterschied zwischen dem ersten und letzten Lichtweg, der durch das Produkt aus $n\tau$ mit der Lichtgeschwindigkeit berechnet werden kann, erreicht werden durch einen kleinen Wert von τ und dementsprechend großen Wert von n ohne einen großen Wert von m , es kann aber auch erreicht werden durch einen großen Wert von τ und großen Wert von m ohne einen großen Wert von n .

Beide Fälle sind durch die gebräuchlichen Spektralapparate tatsächlich verwirklicht, und beide haben ihre Vorteile und Nachteile, wie nun des näheren auseinandergesetzt werden soll.

29 Das ebene Gitter Eine spiegelnde ebene Fläche sei von einer großen Reihe dicht aneinander liegender gerader aquidistanter Furchen durchzogen, und es falle auf die Fläche Licht von einer punktförmigen Lichtquelle A auf, deren Entfernung groß genug ist, daß alle Strahlen nach der Fläche hin als parallel betrachtet werden können. Wir wollen eine durch die Lichtquelle parallel zu den Strahlen gelegte Ebene als senkrecht zu den Furchen annehmen und nur Strahlen in dieser Ebene betrachten. Die durchfurchte Fläche, die man Gitter nennt, kann in eine Anzahl Rechtecke eingeteilt werden, von denen jedes eine Furche enthält. Die Rechtecke gleichen einander genau und haben alle die Breite b . Jedes Rechteck wird durch die Bestrahlung zu einer Lichtquelle, die infolge der Furche ihr Licht nach allen Seiten sendet. Betrachten wir nun die Lichtbewegung in einem Punkte B der Strahlenebene, der ebenfalls weit genug entfernt liegt, daß die Strahlen von der Fläche nach B als parallel betrachtet werden können. Die Winkel, welche die Richtungen von der Fläche nach A und B mit der Flächennormalen bilden, seien φ_A und φ_B , auf der Seite von A positiv, auf der anderen negativ gerechnet. Der Unterschied der Wege von A über das erste Rechteck und von A über das zweite Rechteck bis B ist dann für entsprechende Punkte der beiden Rechtecke gleich

$$b \sin \varphi_B + b \sin \varphi_A,$$

der Zeitunterschied zwischen dem Eintreffen des vom ersten und vom zweiten Rechteck zurückgeworfenen Lichtbündels also gleich

$$\tau = \frac{b \sin \varphi_B + b \sin \varphi_A}{c},$$

wenn c die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Derselbe Zeitunterschied liegt zwischen dem Eintreffen der Lichtstrahlen von je zwei aufeinanderfolgenden Lichtbündeln. Ist ν die Schwingungszahl des von A ausgehenden Lichtes, so werden wir in denjenigen Richtungen φ_B eine namhafte Lichtbewegung beobachten, für die $\nu\tau$ eine ganze Zahl ist. $\tau = 0$ bedeutet dabei $\sin \varphi_B + \sin \varphi_A = 0$, also $\varphi_B = -\varphi_A$, d. h. das von der Fläche nach dem Reflexionsgesetz zurückgeworfene Licht. Diese Richtung φ_B ist von ν unabhängig. Die Spektren der verschiedenen Ordnungen

$$\frac{b\nu}{c} (\sin \varphi_B + \sin \varphi_A) = \pm m$$

oder, wie wir auch schreiben können, wenn wir die Wellenlänge $\lambda = c/\nu$ einführen,

$$b (\sin \varphi_B + \sin \varphi_A) = \pm m \lambda$$

können wir uns durch eine Figur deutlich machen, wenn wir mit b über der Fläche einen Halbkreis beschreiben, dessen Radius die Richtung φ_A und die verschiedenen

Richtungen φ_B darstellen (Abb 14). Wir projizieren den Endpunkt des Radius $-\varphi_A$, der den direkt reflektierten Strahl darstellt, auf den Durchmesser. Von diesem Punkte 0 aus tragen wir auf dem Durchmesser des Halbkreises nach beiden Seiten die Strecken 1λ , 2λ usw auf, soweit sie auf dem Durchmesser Platz haben. Die den Teilpunkten entsprechenden Radien, deren Enden sich in den Punkten projizieren, stellen die Richtungen der verschiedenen Ordnungen dar. Die Zahl der Ordnungen kann, wie man sieht, nicht größer sein als $2b/\lambda$ (die Ordnung $m = 0$ mitgezählt). Bei den gebräuchlichen Gittern ist b in der Regel

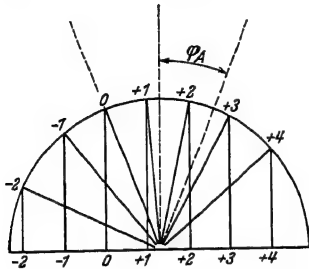


Abb 14 Die verschiedenen Ordnungen im Gitterspektrum

ungefähr gleich $2 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 20000 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$. Grünes Licht von etwa $5000 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$ Wellenlänge wird dann in nicht mehr als 8 Ordnungen, violettes Licht von etwa $4000 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$ in nicht mehr als 10 Ordnungen auftreten. Um die höchste vorkommende Ordnung bei gegebenem b und λ möglichst hoch zu machen, wird man φ_A nahe an 90° gehen lassen. Dann rückt der Punkt 0 der Abb 14 an das Ende des Durchmessers, und das andere Ende gibt den größten Wert von m . Für $b = 20000 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$ gehen 5000 Furchen auf ein Zentimeter. Bei einer durchfurchten Fläche von 15 cm wird die Zahl der Furchen also 75000.

Bei grünem Licht wird der höchste Wert von m gleich 7. Das Produkt nm , das, wie in Ziff 31 näher ausgeführt wird, die auflösende Kraft des Gitters bestimmt, wird also gleich 525000. Man sieht, daß eine Verkleinerung von b bei gleicher Breite der durchfurchten Fläche die auflösende Kraft nicht steigern würde. Denn obgleich $n = D/b$ (D die ganze Breite der durchfurchten Fläche) mit abnehmendem b wächst, so ist $m = 2b/\lambda$ und daher

$$nm = 2D/\lambda$$

D ist der größte Wegunterschied, der bei den n Strahlenbündeln vorkommen kann, D/λ also die Zahl der Wellen, die auf diesem größten Wegunterschied liegen. Auf diesen größten Wegunterschied also kommt es bei gegebener Wellenlänge an, wenn es sich um die auflösende Kraft handelt.

In der Praxis liegt die Lichtquelle A in der Regel nicht in weiter Entfernung, sondern wird durch eine Sammellinse, die das von A ausgehende Licht parallel auf das Gitter fallen läßt, virtuell ins Unendliche geworfen. Ebenso wird das von der durchfurchten Fläche zurückgeworfene Licht durch eine Sammellinse in einem Punkte B konzentriert, so daß für die verschiedenen Wellenlängen ein Spektrum entsteht, das von den verschiedenen Punkten B gebildet wird. Die beiden Sammellinsen können auch durch eine einzige ersetzt werden (LITROWS Anordnung), die unmittelbar vor dem Gitter steht und deren optische Achse für höhere Ordnungen mit der Gitternormalen einen großen Winkel bilden muß. Bei jeder Stellung des Gitters gegen die Linsenachse überblickt man nur einen verhältnismäßig kleinen Teil des Spektrums, weil man sich nicht zu weit von der optischen Achse entfernen kann, ohne an Güte der Abbildung zuviel zu verlieren. Durch Drehung des Gitters gelangen dann die verschiedenen Wellenlängen in den Bereich der Betrachtung.

Im vorstehenden wurden nur Reflexionsgitter betrachtet, die in neuerer Zeit die hauptsächlich früher benutzten Transmissionsgitter verdrängt haben. Die Transmissionsgitter tragen auf einer Planplatte durchsichtigen Materials (Glas oder Quarz) die Gitterteilung und werden gewöhnlich so verwendet, daß das vom Kollimator kommende Licht senkrecht auf die Fläche fällt. Die unter dem

Winkel φ gebeugten Strahlen gelangen ins Fernrohr, und es besteht zwischen λ , φ und b (Gitterkonstante) die Beziehung

$$b \sin \varphi = m \lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

Fällt aber das Licht unter dem Winkel ψ auf das Gitter auf, so lautet die Beziehung

$$b (\sin \psi \pm \sin \varphi) = m \lambda$$

Das positive Zeichen gilt, wenn einfallender und gebeugter Strahl auf der gleichen, das negative, wenn die Strahlen auf verschiedenen Seiten des Einfallslotes liegen

30 Formel für die Interferenz der n Lichtbündel Die Zusammensetzung der n Lichtbündel im Punkte B möge auch mathematisch formuliert werden. Stellt im Punkte B

$$a \sin(\nu t 2\pi)$$

die Lichtbewegung dar, die von dem ersten Rechteck des ebenen Gitters herrührt, so wird die von dem zweiten Rechteck herrührende Bewegung durch

$$a \sin(\nu(t + \tau) 2\pi)$$

dargestellt, wo τ die Zeitdifferenz angibt, um welche die zweite Bewegung früher (τ positiv) oder später (τ negativ) in B eintrifft. Für jedes folgende Rechteck wird ein τ hinzutreten, so daß die Gesamtbewegung durch die Formel dargestellt wird

$$a [\sin(\nu t 2\pi) + \sin(\nu(t + \tau) 2\pi) + \dots + \sin(\nu(t + (n-1)\tau) 2\pi)]$$

Wir setzen $\varphi = \nu t 2\pi$ und $\alpha = \nu \tau 2\pi$ und erhalten

$$a [\sin \varphi + \sin(\varphi + \alpha) + \sin(\varphi + 2\alpha) + \dots + \sin(\varphi + (n-1)\alpha)]$$

Das ist der imaginäre Teil von

$$\begin{aligned} a(e^{i\varphi} + e^{i(\varphi+\alpha)} + \dots + e^{i(\varphi+(n-1)\alpha)}) &= a e^{i\varphi} (1 + e^{i\alpha} + \dots + e^{i(n-1)\alpha}) \\ &= a e^{i\varphi} \frac{e^{in\alpha} - 1}{e^{i\alpha} - 1} = a e^{i\varphi} e^{i\frac{n-1}{2}\alpha} \frac{e^{i\frac{n}{2}\alpha} - e^{-i\frac{n}{2}\alpha}}{e^{i\frac{\alpha}{2}} - e^{-i\frac{\alpha}{2}}} \\ &= a e^{i\varphi} e^{i\frac{n-1}{2}\alpha} \frac{\sin\left(\frac{n}{2}\alpha\right)}{\sin\frac{\alpha}{2}} \end{aligned}$$

Der imaginäre Teil hiervon ist

$$a \frac{\sin\left(\frac{n}{2}\alpha\right)}{\sin\frac{\alpha}{2}} \sin\left(\varphi + \frac{n-1}{2}\alpha\right)$$

Mit anderen Worten: die n Lichtbewegungen setzen sich zu einer Lichtbewegung zusammen, deren Amplitude aus der Amplitude a jeder einzelnen durch die Multiplikation mit

$$\frac{\sin(n\tau\pi)}{\sin(\tau\pi)}$$

sich ergibt, deren Intensität also dem Quadrat dieses Ausdrucks proportional ist. Die Intensität erhält ihren größten Wert $a^2 n^2$, wenn alle n Lichtbewegungen in Phase sind, d. h. $\nu\tau$ eine ganze Zahl m ist. In dem obigen Ausdruck verschwinden dann Zähler und Nenner. Setzt man aber $\nu\tau = m + \varepsilon$, so erhält man

$$\pm \frac{\sin(n\varepsilon\pi)}{\sin(\varepsilon\pi)},$$

und das ist für hinreichend kleine Werte von ε beliebig wenig von

$$\pm \frac{n\varepsilon\pi}{\varepsilon\pi} = \pm n$$

verschieden, in das es also für $\varepsilon = 0$ übergeht. Die Intensität verschwindet, wenn $n\nu\tau$ eine ganze Zahl ist, ohne daß $\nu\tau$ zugleich ganz ist. Um uns von dem Verlauf der Intensität J als Funktion der Phasenänderung $\nu\tau$ ein Bild zu machen, denken wir uns zwischen $\nu\tau = m$ und $\nu\tau = m + 1$ als Abszissen die Ordinate

$$\frac{a^2}{\sin^2(\nu\tau\pi)}$$

gezeichnet. Die Kurve geht bei $\nu\tau = m$ und $m + 1$ ins Unendliche, während J an diesen Stellen seinen Maximalwert $n^2 a^2$ annimmt. Da $\sin^2(n\nu\tau\pi)$ immer kleiner als 1 ist, so bleibt J immer unter der gezeichneten Kurve, die es zwischen m und $m + 1$ nur in den Punkten $n\nu\tau = \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}$ erreicht. Diese Ordinaten sind zwar nicht genau die Maxima von J , weichen aber schon für $n\nu\tau = \frac{3}{2}$ nur wenig von ihnen ab. Das erste Maximum von J zwischen m und $m + 1$ liegt z. B. nahezu bei $n\nu\tau = \frac{3}{2}$ und hat nahezu den Wert

$$a^2 \frac{1}{\sin^2\left(\frac{3\pi}{2n}\right)},$$

also für große Werte von n genähert

$$a^2 \frac{4}{9\pi^2} n^2,$$

d. h. weniger als 5% des größten Wertes.

Die Formel für die Intensität J stellt uns nicht nur dar, wie an einer bestimmten Stelle B des Spektrums für ein anderes ν die Intensität des Lichtes sich ändert, sondern auch, wie langs des Spektrums für eine festgehaltene Farbe ν die Intensität sich ändert. Wir haben dann nur als die Veränderliche die Größe τ aufzufassen, deren Wert sich ja langs des Spektrums ändert. Die Kurve, die J als Funktion von $\nu\tau$ darstellt, ist also zugleich das Bild der Intensitätsverteilung über den Querschnitt einer Spektrallinie. Sie besteht strenggenommen aus einem Hauptmaximum an der Stelle $\tau = m/\nu$, das aber auf beiden Seiten von sekundären Maximis ungefähr an den Stellen

$$\tau = \frac{m}{\nu} \pm \frac{3}{2\nu n}, \quad \frac{m}{\nu} \pm \frac{5}{2\nu n} \quad \text{usf.}$$

begleitet ist. Diese sekundären Maxima bleiben in der Regel unter der Beobachtungsschwelle, außer wenn es sich um starke Linien handelt und wenn die Justierung sehr sorgfältig ist.

31 Die auflösende Kraft des Gitters. Eine benachbarte Spektrallinie, deren Schwingungszahl $\nu \pm \Delta\nu$ so viel von ν abweicht, daß ihr Hauptmaximum m ter Ordnung an die Stelle $\tau' = \tau \mp \frac{1}{\nu n}$ fällt, wo die Intensität der ersten Spektrallinie zum erstenmal verschwindet, ist noch als besondere Linie von der ersten zu unterscheiden. Bis auf Größen zweiter Ordnung ist aber $\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{\tau' - \tau}{\tau}$, mithin

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{1}{\tau\nu n} = \frac{1}{mn}$$

RAYLEIGH hat die Größe $\nu/\Delta\nu = mn$ die „auflösende Kraft“ des Gitters genannt. Das ist bis zu einem gewissen Grade willkürlich, denn es ist damit nicht gesagt, daß man nicht auch ein engeres Linienpaar noch als doppelt erkennen konnte.

32 Einfluß der Furchenform Die Amplitude a des Lichtes, das von einem Rechteck zurückgeworfen wird, hängt von der Gestalt der Furchen ab und ist außerdem eine Funktion der Richtungen des einfallenden und des zurückgeworfenen Lichtes. Man kann sich z. B. die Furchen als Gräben mit ebenen Seitenflächen denken. Ist die Wellenlänge des Lichtes nur ein Bruchteil der Breite dieser Seitenflächen, so wird jede von ihnen das auffallende Licht im wesentlichen wie ein ebener Spiegel nach dem Reflexionsgesetz zurückwerfen. Das zurückgeworfene Licht wird dann in gewissen Ordnungen des Spektrums viel stärker sein können als in anderen, ja selbst als in dem direkten Bilde ($m = 0$). In der Regel zeigen die Gitter in den Spektren gleicher Ordnung auf entgegengesetzten Seiten des direkten Bildes ganz verschiedene Helligkeit. Auf derselben Seite des direkten Bildes mußte die Helligkeit einer Farbe mit wachsender Ordnungszahl abnehmen, weil die Dispersion zunimmt. Durch die besondere Gestalt der Furchen ist das aber manchmal nicht der Fall, so daß eine höhere Ordnung besonders hervortritt.

33 Koinzidenzen von Linien verschiedener Wellenlänge Durch die beiden Sammellinsen, die das einfallende Licht parallel machen und das zurückgeworfene Licht wieder im Spektrum vereinigen, werden für die verschiedenen Farben in den Lichtwegen Unterschiede eingeführt, weil sich keine Sammellinse konstruieren läßt, die für alle Farben die gleiche Brennweite besitzt. Das kann unter Umständen ein Vorteil sein, weil dadurch die Spektren verschiedener Ordnungen unterschieden werden können. Bei Okularbeobachtungen allerdings sind sie schon durch die Farbe zu unterscheiden, bei photographischen Aufnahmen fällt dagegen diese Möglichkeit der Unterscheidung fort. Unter anderen Umständen kann es aber gerade erwünscht sein, die verschiedenen Ordnungen des Spektrums längs derselben Kurve übereinandergelagert zu erhalten, um die Wellenlängen zweier verschiedener Farben aufeinander zu beziehen. Wenn z. B. die eine Spektrallinie in dritter Ordnung mit einer anderen in vierter Ordnung zusammenfällt, so müssen die beiden Schwingungszahlen die Beziehungen

$$\nu_1 \tau = 3 \quad \text{und} \quad \nu_2 \tau = 4$$

für den gleichen Wert von τ erfüllen. Sie verhalten sich also wie 3 : 4 und ihre Wellenlänge wie 4 : 3. Auch wenn die beiden Linien nicht genau zusammenfallen, sondern nur nahe beieinander liegen, wird man ihr Verhältnis ermitteln können. Denn wenn $\nu_1 \tau = 3$, $\nu_2 \tau' = 4$ und τ' sehr wenig von τ verschieden ist, so wird eine auch nur grob richtige Schätzung des Maßstabes des Spektrums ermöglichen, mit hoher absoluter Genauigkeit anzugeben, welche Änderung $\Delta \nu$ von ν_2 dem Abstand der beiden Linien entspricht, so daß dann

$$\nu_1 \nu_2 + \Delta \nu = 3 : 4$$

34 Das Konkavgitter Das Aufeinanderfallen der verschiedenen Ordnungen hat ROWLAND unter Verzicht auf die beiden Sammellinsen dadurch erreicht, daß er die Furchen statt auf eine ebene Fläche auf einen Hohlspiegel einritzte. Dieser Apparat wird ein Konkavgitter genannt. Das von einem leuchtenden Punkt ausgehende Licht wird dadurch ohne weitere Apparate in ein Spektrum auseinandergezogen, bei dem alle Ordnungen genau übereinanderfallen. Zugleich wird der große Vorteil erreicht, daß das Spektrum in allen vorhandenen Richtungen gleichzeitig beobachtet werden kann, während bei Anwendung von Sammellinsen oder Hohlspiegeln immer nur ein verhältnismäßig kleiner Teil des Spektrums entworfen wird. Welche Nachteile andererseits das Konkavgitter gegenüber dem ebenen Gitter besitzt, wird eine eingehendere Diskussion zeigen.

Von einem leuchtenden Punkte A falle ein Strahl auf einen Punkt P einer beliebig gekrümmten Fläche. Von P aus werde das Licht nach allen Richtungen

zerstreut und gelange unter anderem auf geradem Wege nach einem Punkt B . Das Medium, in dem sich das Licht bewegt, sei überall dasselbe. Wir wollen untersuchen, wie sich die Phase des in B eintreffenden Lichtes ändert, wenn P auf der Fläche sich verschiebt. Die Zeit ergibt sich aus dem Wege

$$AP + PB$$

durch Division mit der Lichtgeschwindigkeit. Wir haben also die Änderungen dieses Weges zu untersuchen.

Denken wir uns ein Rotationsellipsoid mit den Brennpunkten A und B durch den Punkt P gelegt, das die Fläche in einer Kurve schneidet, so wird $AP + PB$ sich nicht ändern, wenn P sich langs dieser Kurve bewegt. Konstruieren wir nun eine Schar von konfokalen Rotationsellipsoiden, so erhalten wir auf der Fläche eine Kurvenschar, für die $AP + PB$ sich nicht ändern wird, wenn P sich langs irgendeiner Kurve der Schar bewegt. Wir wollen uns eine Reihe dieser Kurven so gezogen denken, daß der Weg $AP + PB$ sich von einer Kurve zur nächsten um $c\tau$ ändert, wo c die Lichtgeschwindigkeit und τ ein kleines Zeitintervall bedeutet. Dadurch wird die Fläche in eine Reihe von Streifen eingeteilt. Gesetzt nun, wir könnten durch Ritzen der Fläche bewirken, daß nur die Ränder der Streifen Licht zurückwerfen, während es zwischen den Rändern verschluckt wird, so würde die Lichtbewegung in B sich aus einer Reihe von Lichtbündeln zusammensetzen, von denen jedes gegen das vorhergehende um die Zeit τ verschoben ist. Ist nun ν die Schwingungszahl des Lichtes, so wird jedes Bündel um $\nu\tau$ Schwingungen gegen das vorhergehende verschoben sein. Wenn daher $\nu\tau$ gleich einer ganzen Zahl m ist, so werden sie alle mit der gleichen Phase in B eintreffen und sich verstärken (vgl. Ziff 6). Licht von benachbarten Schwingungszahlen wird in B durch Interferenz sich aufheben, aber es leuchtet ein, daß bei passender Verschiebung von B wieder bis zu einem gewissen Grade die Phasengleichheit der Lichtbündel erreicht werden können, so daß also ein Spektrum entsteht, bei dem die verschiedenen Ordnungen zusammenfallen.

35 Die Lage des Spektrums beim Konkavgitter. Bei dem ROWLANDSchen Konkavgitter wird eine sphärische Fläche in aquidistanten parallelen Ebenen geritzt. Wir wollen die xy -Ebenen senkrecht zu jenen Ebenen annehmen, den Nullpunkt in die Mitte der durchfurchten Fläche legen und den Mittelpunkt der Kugelfläche auf der x -Achse annehmen. Die Punkte A und B sollen beide in der xy -Ebene liegen, und wir wollen uns zunächst auf die Strahlen in der xy -Ebene beschränken. Ist P ein Punkt der Kugelfläche, wo sie von der xy -Ebene geschnitten wird, und sind x und y seine Koordinaten, so ist

$$x^2 + y^2 = 2\rho x,$$

wobei ρ den Radius der Kugel bedeutet. Es seien x_A, y_A die Koordinaten des Punktes A und r_A seine Entfernung vom Nullpunkt, so ist

$$\begin{aligned}\overline{AP} &= \sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2} = \sqrt{r_A^2 - 2x_A x - 2y_A y + x^2 + y^2} \\ &= \sqrt{r_A^2 + 2(\rho - x_A)x - 2y_A y} \\ &= \sqrt{r_A^2 - 2y_A y + \left(1 - \frac{x_A}{\rho}\right)(y^2 + x^2)}\end{aligned}$$

Nun ist x gegen y von zweiter Ordnung, x^2 also von vierter Ordnung. Mithin erhalten wir durch Entwicklung nach Potenzen von y

$$\overline{AP} = r_A - \frac{y_A}{r_A}y + \left[1 - \frac{x_A}{\rho} - \left(\frac{y_A}{r_A}\right)^2\right] \frac{y^2}{2r_A} + \text{höhere Ordnung}$$

und analog für \overline{BP}

$$\overline{BP} = r_B - \frac{y_B}{r_B}y + \left[1 - \frac{x_B}{\rho} - \left(\frac{y_B}{r_B}\right)^2\right] \frac{y^2}{2r_B} + \text{höhere Ordnung}$$

Sind φ_A und φ_B die Winkel der Richtungen OA und OB mit der x -Achse, so ist $x_A = r_A \cos \varphi_A$, $y_A = r_A \sin \varphi_A$ und analog für B . Mithin ergibt sich

$$\overline{AP} + \overline{BP} = r_A + r_B - (\sin \varphi_A + \sin \varphi_B) y \\ + \left(\frac{\cos^2 \varphi_A}{r_A} + \frac{\cos^2 \varphi_B}{r_B} - \frac{\cos \varphi_A}{\varrho} - \frac{\cos \varphi_B}{\varrho} \right) \frac{y^2}{2} + \text{höhere Ordnung}$$

Von einer Furche zur nächsten nimmt y in entsprechenden Punkten um einen Betrag b zu. Wir fragen, wie muß bei gegebener Lage von A der Punkt B gewählt werden, damit der Weg $\overline{AP} + \overline{BP}$ auch von Furche zu Furche mit hinreichender Genauigkeit immer um den gleichen Betrag $c\tau$ sich ändert? Dazu mußte $\overline{AP} + \overline{BP}$ linear von y abhängen, und der Koeffizient von y mußte gleich $c\tau/b$ sein, d. h. es mußten in der Entwicklung nach Potenzen von y alle Glieder verschwinden, die von höherer als der ersten Ordnung sind, und zugleich mußte

$$b(\sin \varphi_A + \sin \varphi_B) = c\tau$$

sein. Nehmen wir nun an, daß die Breite der durchfurchten Fläche klein ist gegen die Entfernungen r_A und r_B , so werden in der Entwicklung nach Potenzen von y die höheren Glieder eine geringere Rolle spielen. Wir werden daher die Lage von B so zu wählen haben, daß das Glied mit y^2 verschwindet, während das Nichtverschwinden der weiteren Glieder ertragen werden muß. Denn da wir nur die beiden Größen φ_B und r_B zur Verfügung haben, so können wir außer der Bedingung

$$b(\sin \varphi_A + \sin \varphi_B) = c\tau$$

nur noch eine Bedingung erfüllen. Diese zweite Bedingung ist.

$$\frac{\cos^2 \varphi_A}{r_A} + \frac{\cos^2 \varphi_B}{r_B} - \frac{\cos \varphi_A}{\varrho} - \frac{\cos \varphi_B}{\varrho} = 0$$

Durch die Erfüllung dieser beiden Bedingungen wird nun zwar die Zeitdifferenz τ von Furche zu Furche nicht genau denselben Wert haben, aber wenn die Abweichung von einem mittleren Wert so klein ist, daß die entsprechende Phasendifferenz bei der Interferenz der n Lichtbündel nicht in Betracht kommt, so können wir uns damit begnügen.

Die zweite Bedingung ist die Gleichung einer gewissen Kurve in Polarkoordinaten r_B , φ_B des Punktes B , die sich mit der Lage des Punktes A ändert. Wir können sie in der Form schreiben

$$\cos \varphi_B \left(\frac{\varrho \cos \varphi_B}{r_B} - 1 \right) = -\cos \varphi_A \left(\frac{\varrho \cos \varphi_A}{r_A} - 1 \right)$$

Die rechte Seite der Gleichung ist von der Lage des Punktes B unabhängig. Für jede Richtung φ_B läßt sich dann r_B leicht berechnen. Auf der Kurve, die sich auf diese Weise für B ergibt, haben wir uns nun nach der ersten Gleichung eine τ -Skala angebracht zu denken, die in jedem Punkte durch die Gleichung

$$n\tau = m$$

(m eine ganze Zahl) (vgl. Ziff 7), die Schwingungszahlen der verschiedenen Ordnungen bestimmt, die sich an der betreffenden Stelle überlagern. $\tau = 0$, also $\varphi_B = -\varphi_A$, entspricht dem direkten Bilde des Punktes A . Die zweite Gleichung geht dann in die gewöhnliche Gleichung der reflektierten Strahlen über

$$\cos \varphi \left(\frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} \right) = \frac{2}{\varrho}$$

36 Der ROWLANDSche Kreis Ein spezieller Fall verdient besonders hervorgehoben zu werden. Liegt nämlich der Punkt A auf dem Kreise $r_A = \varrho \cos \varphi_A$,

dessen Durchmesser die Strecke vom Anfangspunkt zum Mittelpunkt der Kugelfläche ist, so verschwindet die rechte Seite der Gleichung, und es wird

$$\frac{\varrho \cos \varphi_B}{r_B} - 1 = 0,$$

d. h. B muß ebenfalls auf demselben Kreise liegen. Dieser Kreis wird der ROWLANDSche Kreis genannt, und einige Methoden der Aufstellung des Konkavgitters benutzen ihn. ROWLAND setzt (vgl. Abb. 15) das Gitter G und die Kamera K zum Photographieren des Spektrums an die Enden eines Balkens von der Länge ϱ , der mit zwei Zapfen auf zwei Wagen ruht, die auf den beiden Schenkeln eines rechten Winkels rollen. Der Spalt S steht im Scheitel des rechten Winkels, und die Kamera bildet einen Kreisbogen vom Radius $\varrho/2$. K, G, S liegen durch diese Anordnung für jede Stellung des Balkens GK auf dem ROWLANDSchen Kreise. Bei ROWLAND nimmt die Kamera einen verhältnismäßig kleinen Teil des Kreises ein; φ_B wird nicht größer als etwa 3° . Das hat den Vorteil, daß der Maßstab des Spektrums, auf Wellenlängen der ersten Ordnung bezogen, für den ganzen von der Kamera enthaltenen Bereich sehr nahe konstant ist. Denn in der ersten Ordnung ist

$$v\tau = \frac{c}{\lambda} \tau = 1,$$

also $d\lambda = c d\tau = b \cos \varphi_B d\varphi_B$. Das diesem Winkel $d\varphi_B$ entsprechende Stück ds des Spektrums hat die Länge $\varrho d\varphi_B$, da der Radius des Kamerakreises gleich $\varrho/2$ und der zugehörige Zentrwinkel gleich $2d\varphi_B$ ist. Mithin ist

$$\frac{d\lambda}{ds} = \frac{b}{\varrho} \cos \varphi_B = \frac{b}{\varrho} - \frac{2b}{\varrho} \sin^2 \left(\frac{\varphi_B}{2} \right)$$

Da φ_B höchstens etwa gleich $1/20$ ist, so wird $d\lambda/ds$ etwa bis auf $1/800$ seines Betrages gleich b/ϱ sein. Oder anders ausgedrückt, wenn man mit λ_0 die Wellenlänge an der Stelle $\varphi_B = 0$ bezeichnet, so ist

$$\lambda - \lambda_0 = b \sin \varphi_B = b \sin \left(\frac{s}{\varrho} \right) = \frac{b}{\varrho} s - \frac{b}{6} \left(\frac{s}{\varrho} \right)^3 \quad | -$$

Setzt man $\lambda - \lambda_0 = \frac{b}{\varrho} s$, so wird man einen Fehler begehen von etwa der Größe

$$\frac{b}{6} \left(\frac{s}{\varrho} \right)^3 = (\lambda - \lambda_0) \frac{1}{6} \left(\frac{s}{\varrho} \right)^2,$$

also höchstens etwa $\frac{\lambda - \lambda_0}{2400}$. Bei den großen ROWLANDSchen Gittern ($\varrho = 650$ cm, $b = 1,76 \cdot 10^{-4}$ cm) ist b/ϱ ungefähr gleich $2,7 \cdot 10^{-7}$, so daß auf 1 cm im Spektrum eine Wellenlängendifferenz von $27 \cdot 10^{-8}$ cm kommt. Für $\varphi_B = 3^\circ$ wird also $\lambda - \lambda_0$ gleich $650 \cdot 10^{-8}$ cm, $\frac{\lambda - \lambda_0}{2400}$ gleich $0,27 \cdot 10^{-8}$ cm, ein Betrag, der keineswegs zu vernachlässigen ist, der aber ohne Schwierigkeit in Rechnung gestellt werden kann.

Eine andere Anordnung besteht darin, daß man die Kamera oder den Spalt oder auch beide auf den Endpunkt von Radien von der Länge $\varrho/2$ setzt, die um die Mitte zwischen Gitter und Zentrum der Kugelfläche drehbar sind (ABNEY). Eine dritte Aufstellung endlich setzt Spalt, Gitter und Kamera fest auf eine feste Unterlage, wobei die Kamera längs des ROWLANDSchen Kreises auf beiden Seiten des Spaltes verläuft (RUNGE und PASCHEN). Als Unterlage dient für große

ROWLANDSche Gitter ein eisernes Gerüst aus I-Trägern, die langs des ROWLANDSchen Kreises durch einen horizontalen Tisch verbunden sind und an ihrem einen Ende auf Stahlwalzen ruhen, so daß sie sich bei Temperaturänderungen ohne Spannung ausdehnen oder zusammenziehen können. Oder es besteht die feste Unterlage aus einem erschütterungsfreien Betonfußboden, der auf Pfeilern Gitter, Spalt und Kamera trägt.

Konkavgitter von kleinem Krümmungsradius werden zweckmäßig mit festem Gitter, Spalt und fester Kamera auf einer Spiegelglasplatte oder einer starken Schieferplatte aufgestellt.

Wird der Spalt außerhalb des ROWLANDSchen Kreises angenommen, so liegt das Spektrum innerhalb von ihm. Hervorzuheben ist der Fall, daß man durch Linse oder Hohlspiegel den Spalt ins Unendliche wirft, das aufs Gitter fallende Licht also parallel macht (RUNGE und PASCHEN). Die Gleichung des Spektrums ist dann

$$\frac{\varrho \cos^2 \varphi_B}{r_B} = \cos \varphi_B + \cos \varphi_A$$

Der Grund, warum dieser Fall besondere Aufmerksamkeit verdient, wird sich bei der Betrachtung des Astigmatismus des vom Gitter zurückgeworfenen Lichtes zeigen.

37 Abweichungen vom ROWLANDSchen Kreise Bei den Konkavgittern wird in der Regel beobachtet, daß, wenn der Spalt auf dem ROWLANDSchen Kreise steht, das Spektrum nicht genau auf dem ROWLANDSchen Kreise liegt, sondern von dieser Lage ein klein wenig abweicht. Ebenso findet man, daß für irgendeine andere Stellung des Spaltes das Spektrum nicht genau die nach der obigen Formel berechnete Lage hat. Das läßt sich dadurch erklären, daß die Furchen nicht genau in Ebenen gleichen Abstandes gezogen sind, sondern daß der Abstand je zweier aufeinanderfolgenden Ebenen von der einen Seite des Gitters zur anderen sich ändert. Nehmen wir an, diese Änderung erfolge ganz gleichmäßig, so ist der Abstand y der μ ten Ebene vom Nullpunkt aus gezählt in der Form

$$y = b\mu + k\mu^2$$

anzusetzen, wodurch der Abstand zwischen der μ ten und $(\mu + 1)$ ten Ebene gleich

$$b + k(2\mu + 1)$$

wird, also für jeden folgenden Wert von μ sich um $2k$ ändert.

Soll nun $AP + PB$ für jedes folgende μ sich möglichst genau immer um denselben Betrag ändern, so werden wir die Entwicklung nach Potenzen von y durch Einsetzen von

$$y = b\mu + k\mu^2$$

in eine solche nach Potenzen von μ zu verwandeln und den Koeffizienten von μ^2 gleich Null zu setzen haben.

Nun war

$$AP + PB = r_A + r_B - (\sin \varphi_A + \sin \varphi_B) y + \left[\frac{\cos \varphi_B}{r_B} (\varrho \cos \varphi_B - r_B) + \frac{\cos \varphi_A}{r_A} (\varrho \cos \varphi_A - r_A) \right] \frac{y^2}{2\varrho} +$$

Bis zu den Gliedern zweiter Ordnung haben wir also nur $b\mu$ für y einzusetzen, und das Glied

$$- (\sin \varphi_A + \sin \varphi_B) k\mu^2$$

hinzuzufügen. Es bleibt dann die Bedingung

$$(\sin \varphi_A + \sin \varphi_B) b = c\tau$$

bestehen, aber die Gleichung des Spektrums wird

$$\left[\frac{\cos \varphi_B}{r_B} (\varrho \cos \varphi_B - r_B) + \frac{\cos \varphi_A}{r_A} (\varrho \cos \varphi_A - r_A) \right] \frac{b^2}{2\varrho} = (\sin \varphi_A + \sin \varphi_B) k$$

Sei \bar{r}_B die Entfernung, die sich für $k = 0$ ergibt, für die also die eckige Klammer verschwindet. Dann ist

$$\cos^2 \varphi_B \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{\bar{r}_B} \right) = (\sin \varphi_A + \sin \varphi_B) \frac{2k}{b^3} = \frac{2k}{b} \frac{c}{b^2}.$$

Langs des Spektrums ändert sich also die Abweichung $\frac{1}{r_B} - \frac{1}{\bar{r}_B}$ proportional $\tau / \cos^2 \varphi_B$. Im direkten Bilde ($\tau = 0$) ist sie Null und hat auf verschiedenen Seiten des direkten Bildes entgegengesetztes Vorzeichen.

Mit anderen Worten: ein kleiner, linear über das Gitter fortschreitender Fehler in der Gitterteilung wird durch die Veränderung in der Lage des Spektrums kompensiert. Auch bei ebenen Gittern wirkt sich eine monoton veränderliche Gitterkonstante in der Lage des Spektrums aus. Fällt paralleles Licht auf, so liegt das Spektrum nicht im Unendlichen, sondern im Endlichen. Das Gitter hat also „fokale Eigenschaften“.

38 Astigmatismus. Wir haben bisher nur die Strahlen betrachtet, die von A ausgehend in der xy -Ebene verlaufen. Wollen wir auch die anderen auf die durchfurchte Fläche fallenden Strahlen berücksichtigen, so haben wir dem Punkt P eine von Null verschiedene z -Koordinate zu geben und die Gleichung der Kugelfläche in der Form

$$x^2 + y^2 + z^2 = 2\rho x$$

anzusetzen. Die Reihenentwicklungen von \overline{AP} und \overline{PB} sind nun nach Potenzen von y und z zu machen. Es ist

$$\begin{aligned} \overline{AP}^2 &= (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 + z^2 = r_A^2 - 2x_A x - 2y_A y + x^2 + y^2 + z^2 \\ &= r_A^2 - 2y_A y + 2(\rho - x_A)x = r_A^2 - 2y_A y + \left(1 - \frac{x_A}{\rho}\right)(x^2 + y^2 + z^2) \end{aligned}$$

Da x von zweiter Ordnung in y und z ist, so erhalten wir bis auf Glieder vierter Ordnung

$$\overline{AP}^2 = r_A^2 - 2y_A y + \left(1 - \frac{x_A}{\rho}\right)(y^2 + z^2)$$

und somit ähnlich wie oben bis auf Glieder dritter Ordnung

$$\overline{AP} = r_A - \sin \varphi_A y + \frac{\cos \varphi_A}{\rho} (\rho \cos \varphi_A - r_A) \frac{y^2}{2r_A} + \left(1 - \frac{r_A \cos \varphi_A}{\rho}\right) \frac{z^2}{2r_A}$$

Die analoge Entwicklung gilt für \overline{PB} , und es ergibt sich daher für $\overline{AP} + \overline{PB}$ eine Entwicklung, deren lineares Glied wieder wie oben

$$-(\sin \varphi_A + \sin \varphi_B) y$$

ist, deren Glieder zweiter Ordnung jetzt aber die Form haben

$$\left[\frac{\cos \varphi_A}{\rho r_A} (\rho \cos \varphi_A - r_A) + \frac{\cos \varphi_B}{\rho r_B} (\rho \cos \varphi_B - r_B) \right] \frac{y^2}{2} + \left[\frac{1}{r_A} - \frac{\cos \varphi_A}{\rho} + \frac{1}{r_B} - \frac{\cos \varphi_B}{\rho} \right] \frac{z^2}{2}$$

Jetzt wird es aber im allgemeinen nicht möglich sein, durch passende Wahl der Lage von B die Glieder zweiter Ordnung für beliebige Werte von y und z zum Verschwinden zu bringen. Denn wenn der Koeffizient von z^2 gleich Null gesetzt wird, so wird im allgemeinen nicht zugleich auch der Koeffizient von y^2 verschwinden können. Das sieht man am besten aus der Differenz der beiden Koeffizienten. Bezeichnen wir diese Koeffizienten mit K_y und K_z , so erhält man

$$K_z - K_y = \frac{\sin^2 \varphi_A}{r_A} + \frac{\sin^2 \varphi_B}{r_B}.$$

Für gleiches Vorzeichen von r_A und r_B , d. h. wenn A und B auf derselben Seite des Gitters liegen sollen, können die beiden Koeffizienten für endliche Werte

von r_A und r_B nur dann gleichzeitig verschwinden, wenn φ_A und φ_B , also auch $\tau = 0$ ist. D. h. nur im direkten Bilde und nur wenn A auf der x -Achse liegt, kann das Verschwinden der Glieder zweiter Ordnung für beliebige Werte von y und z erreicht werden. Aber so gut, wie wir die Strahlen in der xy -Ebene für sich untersucht haben, können wir auch die Strahlen in der xz -Ebene für sich untersuchen. Sollen ihre Lichtwellen in B mit derselben Phase eintreffen, so muß der Koeffizient von z^2 verschwinden, wenn wir von den Gliedern höherer Ordnung absehen. Es wird also

$$K_z = \frac{1}{r_B} - \frac{\cos \varphi_B}{\varrho} + \frac{1}{r_A} - \frac{\cos \varphi_A}{\varrho} = 0$$

Der Wert von r_B , der sich hieraus ergibt, muß größer sein als der Wert, der sich für dasselbe φ_B aus der Gleichung $K_y = 0$ ableitet. Denn da A und B beide vor dem Gitter liegen sollen, so ist $K_z - K_y$ positiv. Wenn also K_z verschwindet, so muß K_y negativ sein. Wenn nun für einen gewissen Wert von r_B $K_y = 0$ ist, so muß das Glied $-\frac{\cos^2 \varphi_B}{r_B}$, in dem allein r_B vorkommt, verkleinert werden, um K_y negativ zu machen, d. h. r_B muß vergrößert werden. Auf dem im Nullpunkt vom Gitter zurückgeworfenen Strahl OB , auf dem wir oben den Punkt B fanden, für den

$$(\sin \varphi_A + \sin \varphi_B) b = c \tau$$

und $K_y = 0$ ist, liegt also in größerer Entfernung ein zweiter Punkt B' , für den die von der mittlsten Furche zurückgeworfenen Lichtwellen mit gleicher Phase eintreffen. Die entsprechenden durch B' laufenden Strahlen sind bei B zu einer der z -Achse parallelen Linie ausgebreitet, ebenso wie die oben betrachteten durch B in der xy -Ebene laufenden Strahlen in B' zu einer Linie ausgebreitet sind. Die beiden Linien sind die Brennnlinien des gesamten durch

$$(\sin \varphi_A + \sin \varphi_B) b = c \tau$$

bestimmten, vom Gitter zurückgeworfenen Strahlenbündels. Eine punktförmige Lichtquelle A wird also in B nicht wieder punktförmig, sondern durch eine auf der xy -Ebene senkrecht stehende Brennnlinie abgebildet, deren Länge l durch die Furchenlänge L und durch die Entfernungen r_B und $r_{B'}$ der beiden Brennnlinien in der Proportion

$$l : L = r_{B'} - r_B : r_{B'}$$

gegeben ist. Da diese Brennnlinie auf der Spektralkurve senkrecht steht, so erhält man ein brauchbares Spektrum, wenn man in A einen auf der xy -Ebene senkrechten Spalt aufstellt. Die verschiedenen Punkte des Spaltes werden dann zwar über oder unter dem Punkte B nicht punktförmig abgebildet, aber die verschiedenen Brennnlinien fügen sich zu einer Spektrallinie zusammen. Wo die Brennnlinien übereinanderfallen, addieren sich dabei die Intensitäten (es handelt sich ja um inkohärente überlagerte Strahlen), und man kann bei einiger Ausdehnung des Spaltes dieselbe Intensität wie bei stigmatischer Abbildung erreichen.

39 Falle stigmatischer Abbildung Wir fanden oben die Differenz der Koeffizienten K_y und K_z von $y^2/2$ und $z^2/2$ in der Entwicklung von $\overline{AP} + \overline{PB}$ gleich

$$\frac{\sin^2 \varphi_A}{r_A} + \frac{\sin^2 \varphi_B}{r_B}$$

und schlossen daraus, daß für positive Werte von r_A und r_B die beiden Koeffizienten nicht gleichzeitig verschwinden können. Wenn man aber eine der beiden Entfernungen r_A und r_B unendlich werden läßt und die Richtung des anderen Strahles in die Normale des Gitters legt, so verschwindet die Differenz der beiden Koeffizienten, und die Gleichung $K_z = 0$ wird mit $K_y = 0$ identisch. Dann fallen die Punkte B und B' zusammen, und der Astigmatismus verschwindet.

Wir gewinnen somit zwei Möglichkeiten stigmatischer Abbildung

$$\begin{array}{lll} 1 & r_A = \infty, & \varphi_B = 0, \quad \frac{1}{r_B} = \frac{1 + \cos \varphi_A}{\varrho}, \\ 2 & \frac{1}{r_A} = \frac{1 + \cos \varphi_B}{\varrho}, & \varphi_A = 0, \quad r_B = \infty \end{array}$$

Im ersten Fall lassen wir paralleles Licht in irgendeiner Richtung der xy -Ebene auf das Gitter fallen. Dann entsteht in der Richtung der Normalen im Abstand $r_B = \frac{\varrho/2}{\cos^2(\varphi_A/2)}$ ein stigmatisches Bild in den Farben $\nu = \pm \frac{m}{r}$ (m eine ganze Zahl), wo $b \sin \varphi_A = c\tau$. Links und rechts von diesem Punkt wird das Spektrum zwar nicht streng stigmatisch sein, aber der Astigmatismus wird von zweiter Ordnung in φ_B .

Im zweiten Fall bringen wir umgekehrt die Lichtquelle in einen Punkt der Gitternormalen in einer beliebigen Entfernung r_A , die nur zwischen ϱ und $\varrho/2$ liegen muß. Dann beobachten wir das in der Richtung φ_B austretende parallele Licht, wo

$$\cos \varphi_B = \frac{\varrho}{R_A} - 1,$$

z. B. durch ein auf unendlich eingestelltes Fernrohr und erhalten ein stigmatisches Bild der Lichtquelle.

40 Stigmatisches Spektrum durch astigmatische Spaltbeleuchtung Auch für eine beliebige andere Lage des Spaltes kann man an irgendeiner verlangten Stelle des Spektrums eine stigmatische Abbildung des Spaltes erzielen, indem man durch den Spalt ein Lichtbündel mit geeignetem Astigmatismus treten läßt. Die eine Brennnlinie dieses Lichtbündels muß in den Spalt gelegt werden, die andere Brennnlinie in die richtige Entfernung vor den Spalt. Diese Entfernung läßt sich dadurch berechnen, daß man sich an der Stelle des Spektrums, an der man den Astigmatismus beseitigen will, eine punktförmige Lichtquelle denkt und die Lage der Brennnlinien des Lichtbündels betrachtet, das in der Richtung des Spaltes vom Gitter zurückgeworfen wird. Die eine Brennnlinie liegt im Spalt, die andere ergibt sich aus der Gleichung $K_x = 0$, wenn dann für r_A , φ_A die Werte eingesetzt werden, die der Spektralstelle entsprechen, und für φ_B der Wert, der dem Spalt entspricht. r_B ist dann die Entfernung der vor dem Spalt liegenden Brennnlinie vom Gitter, also

$$\frac{1}{r_B} = \frac{\cos \varphi_A + \cos \varphi_B}{\varrho} - \frac{1}{r_A}$$

Allerdings wird der Astigmatismus dadurch nur an der einen Stelle des Spektrums aufgehoben. Aber links und rechts davon ist er wenigstens gering.

Wird bei der festen Aufstellung von Spalt und Kamera auf dem ROWLANDschen Kreise der Astigmatismus an der Spektralstelle $\varphi_B = \sigma$, $r_B = \varrho$, also in der Gitternormalen korrigiert, so ist die zum Spalt senkrechte Brennnlinie im Abstand

$$\frac{\varrho}{\cos \varphi_A}$$

anzuordnen, während der Spalt selbst den Abstand $\varrho \cos \varphi_A$ hat. Diese Brennnlinie liegt also um den Betrag

$$\varrho \frac{\sin^2 \varphi_A}{\cos \varphi_A}$$

vor dem Spalt. Links und rechts von dieser Stelle des Spektrums ist aber die zur Beseitigung des Astigmatismus erforderliche Brennnlinie in größerer Entfernung vom Spalt anzunehmen. Sie hat also für die Stelle des Spektrums in der Gitternormalen ihre kleinste Entfernung vom Spalt, ändert diese also nur wenig für die benachbarten Stellen des Spektrums.

41 Einfluß einer Dispersion des Mediums auf die Koinzidenz verschiedener Ordnungen Wir haben bisher angenommen, daß das Medium, in dem die Lichtbewegung vor sich geht, für alle Farben die gleiche Lichtgeschwindigkeit habe. Die Gleichung

$$(\sin \varphi_A + \sin \varphi_B) b = c \tau$$

ergibt für eine gegebene Lichtquelle und eine gegebene Stelle des Spektrums nur einen Wert von τ , und die verschiedenen Farben, die an dieser Stelle ihre Spektrallinie haben, sind durch

$$v \tau = m \quad (m = 1, 2, \dots)$$

gegeben, d. h. ihre Schwingungszahlen müssen sich wie die Ordnungen der Spektren verhalten, denen sie angehören. Wenn nun aber für zwei Ordnungen m und m' die Lichtgeschwindigkeiten c und c' nicht einander gleich sind, so erhalten wir an derselben Stelle des Spektrums nicht denselben Wert von τ , sondern zwei verschiedene Werte τ und τ' , die durch die Gleichung

$$c \tau = c' \tau'$$

miteinander verbunden sind. Die zugehörigen Schwingungszahlen, für die

$$v \tau = m \quad \text{und} \quad v' \tau' = m',$$

verhalten sich dann also nicht wie m m' , sondern wie $c m$ $c' m'$. Wohl aber verhält sich $\frac{1}{c}$ zu $\frac{1}{c'}$ wie m m' , d. h. also, es verhalten sich die Wellenlängen $\lambda = \frac{c}{v} 2\pi$ und $\lambda' = \frac{c'}{v'} 2\pi$ wie m' m .

42 Die Aberration beim Konkavgitter Wir haben bisher in der Entwicklung von AP | PB nach Potenzen von y und z die Glieder von höherer als der zweiten Ordnung vernachlässigt. Wir wollen jetzt für $z = 0$ die Glieder dritter und vierter Ordnung entwickeln, um zu überschlagen, wie groß der begangene Fehler, die sog. Aberration ist. Es ist

$$\begin{aligned} AP^2 &= r_A^2 - 2v_A y - 2v_A z + y^2 + z^2 \\ r_A^2 &= 2y_A y + y^2 \left(1 - \frac{v_A}{\varrho}\right) + x^2 \left(1 - \frac{v_A}{\varrho}\right) \\ (r_A - \sin \varphi_A y)^2 &+ y^2 \left(\cos^2 \varphi_A - \frac{r_A \cos \varphi_A}{\varrho}\right) + x^2 \left(1 - \frac{r_A \cos \varphi_A}{\varrho}\right) \\ (r_A - \sin \varphi_A y)^2 &\left[1 + y^2 \frac{\cos^2 \varphi_A \varrho - r_A \cos \varphi_A}{\varrho (r_A - \sin \varphi_A y)^2} + x^2 \frac{\varrho - r_A \cos \varphi_A}{\varrho (r_A - \sin \varphi_A y)^2}\right] \end{aligned}$$

Werden die Koeffizienten von y^2 und x^2 in der eckigen Klammer mit u und v bezeichnet, so wird die Wurzel aus der eckigen Klammer gleich

$$\sqrt{1 + y^2 u + x^2 v} = 1 + \frac{1}{2} y^2 u + \frac{1}{2} x^2 v - \frac{1}{8} y^4 u^2 +$$

Da x^2 von vierter Ordnung in y ist, so sind die durch Punkte angedeuteten Glieder von höherer als vierter Ordnung. Somit erhalten wir bis auf Glieder vierter Ordnung

$$\begin{aligned} AP &= r_A - \sin \varphi_A y + \frac{1}{2} y^2 \frac{\cos^2 \varphi_A \varrho - r_A \cos \varphi_A}{\varrho (r_A - \sin \varphi_A y)} + \frac{1}{2} x^2 \frac{\varrho - r_A \cos \varphi_A}{\varrho (r_A - \sin \varphi_A y)} \\ &- \frac{1}{8} y^4 \frac{(\cos^2 \varphi_A \varrho - r_A \cos \varphi_A)^2}{\varrho^2 (r_A - \sin \varphi_A y)^3} \end{aligned}$$

Da es uns auf Glieder fünfter Ordnung nicht ankommt, so können wir in den Nennern der letzten beiden Glieder, die beide von vierter Ordnung sind, statt

$r_A - \sin \varphi_A y$ auch r_A schreiben Das Glied dritter Ordnung ergibt sich aus dem dritten Gliede gleich

$$\frac{1}{2} \frac{(\cos^2 \varphi_A \varrho - r_A \cos \varphi_A)}{\varrho r_A} \frac{\sin \varphi_A y^3}{r_A},$$

während das Glied zweiter Ordnung die Form hat

$$\frac{1}{2} \frac{\cos^2 \varphi_A \varrho - r_A \cos \varphi_A}{\varrho r_A} y^2,$$

wie oben schon gefunden wurde Um die Entwicklung von \overline{PB} zu erhalten, ist nur statt φ_A und r_A zu schreiben φ_B und r_B . In der Entwicklung von $\overline{AP} + \overline{PB}$ verschwinden die Glieder erster und zweiter Ordnung, und das Glied dritter Ordnung wird

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2 \varphi_A \varrho - r_A \cos \varphi_A}{\varrho r_A} \frac{\sin \varphi_A}{r_B} + \frac{\cos^2 \varphi_B \varrho - r_B \cos \varphi_B}{\varrho r_B} \frac{\sin \varphi_B}{r_B} \right) y^3$$

oder, wie wir infolge des Verschwindens des Gliedes zweiter Ordnung auch schreiben können,

$$\frac{1}{2} \frac{\cos^2 \varphi_A \varrho - r_A \cos \varphi_A}{\varrho r_A} \left(\frac{\sin \varphi_A}{r_A} - \frac{\sin \varphi_B}{r_B} \right) y^3$$

Dieser Betrag darf, vorausgesetzt, daß man die höheren Glieder gegen ihn vernachlässigen darf, für den größten vorkommenden Wert von y nicht mehr als etwa den vierten Teil der Wellenlänge des Lichtes betragen Sonst werden die n Lichtbündel sich zum Teil schon gegenseitig durch Interferenz schwächen

Auf dem ROWLANDSchen Kreis und ebenso in den oben betrachteten Fällen $\varphi_A = 0$, $r_B = \infty$ und $\varphi_B = 0$, $r_A = \infty$ verschwindet das Glied dritter Ordnung, und das Glied vierter Ordnung gibt dann die Aberration an Es wird auf dem ROWLANDSchen Kreise gleich

$$\frac{1}{8 \varrho^3} \left(\frac{\sin^2 \varphi_A}{r_A} + \frac{\sin^2 \varphi_B}{r_B} \right) y^4$$

Dieser Umstand, daß das Glied dritter Ordnung verschwindet, ist ein weiterer Grund, die Anordnung des Spaltes und des Spektrums auf dem ROWLANDSchen Kreis zu bevorzugen Bei dieser Anordnung darf die durchfurchte Fläche breiter sein als bei anderer Lage des Spaltes An der Stelle des Spektrums z B, die in der Gitternormalen liegt, haben wir in m ter Ordnung, da $\varphi_B = 0$,

$$\sin \varphi_A b = \lambda m$$

Die zulässige Gitterbreite B ergibt sich dann aus

$$\frac{1}{8 \varrho^3} \frac{\sin^2 \varphi_A}{\varrho \cos \varphi_A} \frac{B^4}{16} = \frac{\lambda}{4}$$

zu

$$B = 2 \varrho \sqrt[4]{\frac{2 b \cos \varphi_A}{m \varrho \sin \varphi_A}}$$

Für ein Konkavgitter von kleinem Krümmungsradius $\varrho = 100$ cm und $b = 1,7 \cdot 10^{-4}$ cm ist z B.

$$B = 8,6 \sqrt[4]{\frac{\cot \varphi_A}{m}} \text{ cm}$$

Bei einer Breite der durchfurchten Fläche von 8,6 cm durfte also $\cot \varphi_A$ nicht kleiner sein als m , wenn nicht die Strahlenbündel, die von den seitlichen Furchen ausgehen, anfangen sollen, die übrige Lichtbewegung an der betrachteten Stelle des Spektrums zu schwächen Für die erste Ordnung wurde $\varphi_A = 45^\circ$ der Grenzwinkel sein, der nicht überschritten werden durfte, für die zweite Ordnung etwa 27° , für die dritte etwa 19° .

43. Auflösungsvermögen des Prismas im Vergleich zum Gitter. Die Methode, durch die man das Auflösungsvermögen eines Gitters auf seine Breite zurückführt oder, besser gesagt, auf den Gangunterschied der über die beiden seitlichen Ränder der durchfurchten Fläche führenden Strahlen, läßt sich auch in analoger Weise anwenden, um die auflösende Kraft eines Prismas oder auch eines Prismensatzes zu ermitteln. Betrachten wir nämlich ein Strahlenbündel von gegebener Wellenlänge, das durch eine rechteckige Blende senkrecht hindurchtritt, so wird es in Richtung der Seiten des Rechtecks gebeugt. Die Lichtbewegung wird nicht nur senkrecht zur Blende sich fortpflanzen, sondern auch in benachbarten Richtungen. Ist $\varphi = 0$ die Richtung senkrecht zur Blende und φ der Winkel mit einer benachbarten Richtung in einer Ebene, die durch die Mitte der Blende senkrecht zu einer Seite des Rechtecks gelegt ist, so wird die Intensitätsverteilung mit wachsendem φ abnehmen und zum erstenmal in der Richtung, für die

$$\sin \varphi = \lambda/b,$$

verschwinden, wo b die Breite des Rechtecks in der betrachteten Ebene und λ die Wellenlänge des Lichtes ist. Teilt man nämlich das Rechteck durch die Mittellinie senkrecht zu der betrachteten Ebene in zwei gleiche Teile, so wird der Gangunterschied der zwei von den beiden Halften in dieser Richtung ausgehenden Lichtbündel gerade eine halbe Wellenlänge, und dadurch heben sie sich gegenseitig auf. Für größere Winkel φ folgen dann weitere Maxima und Minima. Ähnlich wie oben werden wir nun schließen, daß die Farbenzerstreuung des Prismas oder des Prismensatzes zwei Farben voneinander trennt, wenn der Unterschied ihrer Wellenlängen dazu hinreicht, um das erste Minimum der benachbarten Wellenlänge in die Hauptrichtung der ursprünglichen Wellenlänge zu bringen. Wir haben also den Winkel zu berechnen, um welchen die austretende Wellenfront der Wellenlänge λ gedreht wird durch eine Änderung der Wellenlänge um $\delta\lambda$, und diesen Winkel haben wir gleich dem Winkel $\varphi = \lambda/b$ zu setzen, bei dem zwei Strahlenbündel voneinander getrennt werden können. Aus dieser Gleichung läßt sich dann $\delta\lambda/\lambda$ berechnen, d. h. die relative Änderung der Wellenlänge, die durch das Prisma oder das Prismensystem wahrgenommen werden kann.

Sei A_0B_0 die Wellenfront von der gegebenen Wellenlänge vor Eintritt in das Prismensystem (Abb 16), AB die austretende Wellenfront, so ist die Zeit, die das Licht auf dem Wege von A_0 bis A gebraucht, gleich der Zeit auf dem Wege von B_0 bis B und ist kleiner als auf jedem benachbarten Wege zwischen denselben Punkten. Das Licht der benachbarten Wellenlänge $\lambda + \delta\lambda$ wird für dieselben Wege andere Zeiten gebrauchen wegen der veränderten Lichtgeschwindigkeiten in den brechenden Medien. Sei τ_B die Änderung der Zeit auf dem Wege B_0B und τ_A die auf dem Wege A_0A und c die Lichtgeschwindigkeit in dem letzten Medium, so ist die Schwenkung der Wellenfront gleich

$$(c\tau_B - c\tau_A)/b$$

Ist irgendem Wegteil in einem der brechenden Medien mit der Lichtgeschwindigkeit v für die Wellenlänge λ und v' für die Wellenlänge $\lambda + \delta\lambda$, so sind die entsprechenden beiden Zeiten

$$s/v \quad \text{und} \quad s/v'$$

und mit der Lichtgeschwindigkeit c multipliziert

$$ns \quad \text{und} \quad n's,$$

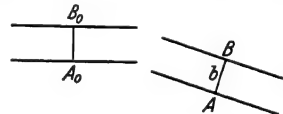


Abb 16 Durchgang einer Welle durch ein Prismensystem

wo n und n' die Brechungskoeffizienten des Mediums gegen das letzte Medium bedeuten. Um also $c\tau_A$ zu berechnen, haben wir alle Wegteile des Weges A_0A mit den beiden Brechungskoeffizienten des betreffenden Mediums gegen das letzte Medium zu multiplizieren und die Differenz

$$(n' - n)s \quad \text{oder} \quad \frac{dn}{d\lambda} s d\lambda$$

zu bilden. Handelt es sich z. B. um einen Prismensatz aus gleicher Glassorte und sind S_A und S_B die Summen der im Glas verlaufenden Teile der Wege A_0A und B_0B , so ist

$$c\tau_A = \frac{dn}{d\lambda} S_A d\lambda, \quad c\tau_B = \frac{dn}{d\lambda} S_B d\lambda$$

und mithin

$$\frac{\frac{dn}{d\lambda} (S_B - S_A) d\lambda}{b} = \frac{\lambda}{b}$$

oder

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{1}{(S_B - S_A)} \frac{dn}{d\lambda}$$

Für ein einziges Prisma, das voll ausgenutzt wird, so daß der eine Randstrahl die brechende Kante schneidet, der andere langs der Basis verläuft, ist $S_A = 0$ und S_B gleich der Basis. Die „auflösende Kraft“ $\lambda/d\lambda$ des Prismas ist dann also gleich der Basislänge multipliziert mit dem Differentialquotienten des Brechungskoeffizienten nach der Wellenlänge.

Wird aus zwei Prismen verschiedener Medien ein Prisma zusammengesetzt derart, daß der eine Randstrahl nur die Basis B_1 des einen Prismas mit dem Brechungskoeffizienten n_1 , der andere nur die Basis B_2 des anderen Prismas mit dem Brechungskoeffizienten n_2 durchläuft, so ist die auflösende Kraft

$$B_2 \frac{dn_2}{d\lambda} - B_1 \frac{dn_1}{d\lambda}$$

Die Werte von $dn/d\lambda$ erhält man für irgendein brechendes Medium aus der Dispersionsformel. Es genügt z. B. in einem nicht zu großen Wellenlängenbereich die Formel

$$n = \alpha + \beta\lambda^{-2},$$

um mit ausreichender Genauigkeit den Brechungskoeffizienten als Funktion der Wellenlänge darzustellen. Dann ist

$$\frac{dn}{d\lambda} = -2\beta\lambda^{-3}$$

die auflösende Kraft eines Prismas, also

$$2B\beta\lambda^{-3}$$

RAYLEIGH gibt ein Beispiel von Flintglas, bei dem

$$\beta = 0,984 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2$$

Für Licht der Wellenlänge $6 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$ wäre die auflösende Kraft daher, wenn B auch in Zentimetern ausgedrückt wird,

$$926 B$$

Die auflösende Kraft wird also für $B = 1 \text{ cm}$ gleich der eines Gitters von 926 Furchen in erster Ordnung. Der große Unterschied zwischen der auflösenden Kraft eines Gitters und der eines Prismas besteht aber darin, daß jene der Schwingungs-

zahl proportional ist¹, diese aber ungefähr proportional der dritten Potenz der Schwingungszahl ansteigt und daher selbst bei mäßigen Dimensionen des Prismas für sehr kleine Wellenlängen der auflösenden Kraft selbst großer Gitter überlegen wird. Um im Orange die auflösende Kraft der zweiten Ordnung eines Gitters von 100 000 Furchen zu haben, mußte ein Prismensatz aus dem oben betrachteten Flintglas eine gesamte Basislänge von zwei Metern haben. Für eine dreimal größere Schwingungszahl dagegen wurde schon eine Basislänge von $7\frac{1}{2}$ cm genügen, um der zweiten Ordnung des Gitters äquivalent, und eine Basis von $22\frac{1}{2}$ cm, um der sechsten Ordnung des Gitters äquivalent zu sein.

44 Geister Die Gitterspektren zeigen meistens in der Nähe starker Spektrallinien auf beiden Seiten eine Reihe schwächerer Begleiter, die nicht etwa zu Schwingungszahlen gehören, wie sie ihrer Stellung im Spektrum entsprechen würden, sondern von dem Lichte der starken Spektrallinie hervorgerufen sind. Sie entstehen durch Fehler in der Gitterteilung. Die Furchen des Gitters werden durch eine Diamantspitze geritzt, die sich immer in derselben Ebene über die Fläche hinwegbewegen läßt, während ein Schlitten, auf dem das Gitter ruht, durch die Drehung einer Schraube nach dem Ziehen einer Furche jedesmal um das gleiche kleine Stück weitergezogen wird. Auf der Schraube ist zu dem Zweck ein Zahnrad befestigt und wird von Furche zu Furche um je einen Zahn gedreht. Meistens weist nun das Zahnrad kleine Unregelmäßigkeiten auf, so daß die Furchen nicht völlig äquidistant werden, Unregelmäßigkeiten, die sich jedoch nach je einer vollen Umdrehung der Schraube genau wiederholen. Die n Strahlenbündel, die von den Furchen zurückgeworfen im Punkte B miteinander interferieren, ergeben also eine Lichtbewegung gleich dem imaginären Teil von

$$e^{i(t + \alpha_0)2\pi\tau} + e^{i(t + \alpha_1)2\pi\tau} + \dots + e^{i(t + \alpha_{n-1})2\pi\tau},$$

wobei jetzt aber die Zeitintervalle $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ nicht mehr die ganzen Vielfachen einer Zeit τ sind, wie es bei einem vollkommenen Gitter sein mußte, sondern wo

$$\alpha_n = (x + f(x))\tau$$

$f(x)$ bedeutet hier einen kleinen positiven oder negativen echten Bruch, der nach einer vollen Umdrehung der Schraube wieder denselben Wert annimmt, aber für die verschiedenen Stellungen der Trommel verschiedene Werte haben kann.

Wir setzen nun

$$e^{i\alpha_n 2\pi\tau} = e^{ix 2\pi\tau} \cdot e^{if(x) \tau 2\pi\tau}$$

und vernachlässigen in der Entwicklung von

$$e^{if(x) \tau 2\pi\tau}$$

nach Potenzen von $f(x) \tau 2\pi\tau$ die Glieder von höherer als der ersten Ordnung, wozu wir bei den sehr kleinen Bruchteilen $f(x)$ berechtigt sind. Dann wird

$$e^{i\alpha_n 2\pi\tau} = e^{ix 2\pi\tau} (1 + f(x) \tau 2\pi\tau)$$

Die in B hervorgerufene Lichtbewegung besteht dann also aus zwei Teilen, dem imaginären Teil von

$$e^{i t 2\pi\tau} + e^{i(t + \tau) 2\pi\tau} + e^{i(t + 2\tau) 2\pi\tau} + \dots + e^{i(t + (n-1)\tau) 2\pi\tau},$$

den wir schon oben (Ziff 30) betrachtet haben und dessen Amplitude wir gleich

$$\frac{\sin(n\tau\pi)}{\sin(\tau\pi)}$$

fanden, und dem imaginären Teil von

$$2\pi\tau e^{i t 2\pi\tau} [f(0) + e^{i\tau 2\pi\tau} f(1) + e^{i2\tau 2\pi\tau} f(2) + \dots + e^{i(n-1)\tau 2\pi\tau} f(n-1)]$$

¹ Denn mit wachsender Schwingungszahl wächst die Ordnung, in der die Spektrallinie noch beobachtet werden kann.

Jetzt möge m die Zahl der Zähne des Zahnrades sein, durch das die Stellungen der Schraube bedingt sind, und r die Anzahl der Umdrehungen der Schraube, so daß also $n = mr$. Dann ist $f(\kappa)$ eine Funktion von κ mit der Periode m und läßt sich in einer FOURIERSchen Reihe darstellen

$$f(\kappa) = a_0 + a_1 \sin(\kappa 2\pi/m + \beta_1) + a_2 \sin(2\kappa 2\pi/m + \beta_2) +$$

Die Reihe ist nicht unendlich, da $f(\kappa)$ nur für ganzzahlige Werte von κ definiert ist, sondern besteht, wenn m gerade ist, aus $(m/2 + 1)$, wenn m ungerade ist, aus $(m/2 + 1/2)$ Gliedern. Setzen wir die FOURIERSche Reihe für $f(\kappa)$ oben ein, so wird dieser Ausdruck eine lineare Funktion von a_0, a_1, \dots , und der Koeffizient von a_s wird

$$2\pi\tau e^{i\kappa 2\pi} \sum_{\kappa=0}^{n-1} \sin(s\kappa 2\pi/m + \beta_s) e^{i\kappa \nu \tau 2\pi}$$

Für die Glieder

$$\kappa = \kappa_1, \kappa_1 + m, \kappa_1 + 2m, \dots, \kappa_1 + (r-1)m \quad (\kappa_1 < m)$$

hat der Sinus dieselben Werte. Wir können sie daher zusammenfassen zu

$$\sin(s\kappa_1 2\pi/m + \beta_s) e^{i\kappa_1 \nu \tau 2\pi} (1 + e^{i m \nu \tau 2\pi} + \dots + e^{i(r-1)m \nu \tau 2\pi})$$

Die Klammer wird ein gemeinsamer Faktor, der genau so gebildet ist wie die oben (Ziff 30) betrachtete Summe, nur daß $m\tau$ an Stelle von τ getreten ist. Sie ist gleich

$$e^{i(r-1)m \nu \tau \pi} \frac{\sin(r m \nu \tau \pi)}{\sin(m \nu \tau)}$$

Wir können diesen Faktor ausklammern und haben dann nur über $\kappa_1 = 0, 1, \dots, m-1$ zu summieren.

Die Summe

$$\sum_{\kappa_1} \sin(s\kappa_1 2\pi/m + \beta_s) e^{i\kappa_1 \nu \tau 2\pi}$$

wird gebildet, indem wir den Sinus wieder durch die Exponentialfunktion ausdrücken. Wir erhalten so die beiden Summen

$$\pm \frac{1}{2i} \sum_{\kappa_1} e^{i(\kappa_1 \nu \tau \pm s\kappa_1/m) 2\pi \pm \beta_s}$$

Das gibt analog wie oben

$$\pm \frac{1}{2i} e^{\pm \beta_s} e^{(m-1)(\nu \tau \pm s/m)\pi} \frac{\sin m(\nu \tau \pm s/m)\pi}{\sin(\nu \tau \pm s/m)\pi}$$

Somit erhalten wir aus dem Gliede

$$a_s \sin(s\kappa 2\pi/m + \beta_s)$$

der FOURIERSchen Entwicklung von $f(\kappa)$ zwei Lichtbewegungen mit den Amplituden

$$a_s \pi \tau \frac{\sin m(\nu \tau \pm s/m)\pi}{\sin(\nu \tau \pm s/m)\pi} \frac{\sin(r m \nu \tau \pi)}{\sin(m \nu \tau \pi)}$$

Der letzte Faktor hat seine Hauptmaxima an den Stellen des Spektrums, wo $\nu m \tau$ eine ganze Zahl ist. Das ist das Spektrum, das wir erhalten wurden bei einer m mal so weiten Gitterteilung, einer Teilung also, wie sie einer vollen Umdrehung der Schraube entspricht. In der Tat ist dies ja eine genaue Periode der Gitterteilung. Die m te Ordnung dieser groben Gitterteilung fällt zusammen mit der ersten Ordnung der feinen, für die ja $\nu \tau = 1$. Aber nicht alle Hauptmaxima des letzten Faktors können eine beträchtliche Amplitude ergeben, sondern nur solche, für die auch der vorletzte Faktor eines seiner Hauptmaxima hat, d. h. nur an den Stellen des Spektrums, wo $\nu \tau \pm s/m$ eine ganze Zahl ist, wo also $\nu \tau$ sich um s/m von einer ganzen Zahl nach oben oder nach unten hin unterscheidet. Aber auch hier haben wir nur dann eine beträchtliche Intensität, wenn der

Koeffizient a_s der FOURIERSchen Entwicklung der Gitterfehler groß genug ist. Ist dies der Fall, so ergibt das also z. B. in dritter Ordnung für die Schwingungszahl ν an beiden Seiten der Spektrallinie, die an der Stelle des Spektrums

$$\tau = 3/\nu = 3\lambda/c$$

erscheint, im Abstand

$$\Delta\tau = s/m \cdot 1/\nu$$

oder, in Wellenlängen dritter Ordnung gemessen, im Abstand

$$3\Delta\lambda = c\Delta\tau = s/m\lambda$$

eine begleitende Spektrallinie, deren Amplitude gleich ist

$$a_s \pi \tau m \nu = a_s \pi \tau n$$

Man nennt diese Begleiter Geister und spricht bei $s = 1, 2, \dots$ von dem ersten, zweiten Geist usw. Man will durch das Wort andeuten, daß die Spektrallinie eine andere Wellenlänge vortauscht, die nicht ihrer Lage entspricht. Der Name erscheint weniger treffend, wenn man bedenkt, daß die genaue Periode des Gitters einer ganzen Umdrehung der Schraube entspricht, jeder Geist also nichts anderes ist als die Spektrallinie dieser Farbe in einer gewissen Ordnung des Spektrums, das von dem Gitter dieser großen Periode $m\lambda$ entworfen wird. Die kleine, nicht genau innegehaltene Periode b löscht dann alle Ordnungen fast ganz aus mit Ausnahme der m ten, $2m$ ten usw.

Die beiden s ten Geister auf verschiedenen Seiten einer Spektrallinie sollten nach der Formel gleich intensiv sein. Das trifft auch einigermaßen zu. Bisweilen ist indessen ein Unterschied deutlich wahrzunehmen, der auf anderen Gitterfehlern beruhen muß, die man nicht kennt. Der Faktor τ in der Amplitude der Geister zeigt, daß dieselbe Farbe in den höheren Ordnungen stärkere Geister zeigen mußte. In zweiter Ordnung z. B. ist für dieselbe Schwingungszahl die Größe τ zweimal so groß, die Intensität der Geister also viermal so groß relativ zur Intensität der Hauptlinie. Auch das ist wenigstens insoweit richtig, als die Geister in höheren Ordnungen relativ zur Hauptlinie wesentlich an Intensität zunehmen.

In der Regel sind die ersten Geister die stärksten, aber ihre Intensität nimmt keineswegs gleichmäßig mit wachsender Ordnungszahl ab. Häufig ist der vierte Geist stärker als der zweite und dritte und ungefähr so stark wie der erste. Bei langen Expositionen starker Linien können manchmal auch bei sonst vorzüglichen Gittern 15 bis 20 Geister auf jeder Seite wahrgenommen werden. Sie lassen sich nicht selten gut verwenden, einmal dadurch, daß sie dieselbe Linie in einer Reihe ganz verschiedener Intensitäten zeigen, aus der man diejenige aussuchen kann, die z. B. ihre Komponenten bei der Zerlegung im magnetischen Felde am besten darstellt, oder sie lassen sich wie eine Skala zur Messung anderer dazwischenliegender Linien verwenden. Denn da man weiß, wieviel Furchen auf eine Umdrehung der Schraube kommen, so weiß man auch, welche Werte von τ den Stellen im Spektrum zukommen, an denen die Geister liegen.

T. LYMAN hat zuerst darauf aufmerksam gemacht, daß außer diesen zuerst von ROWLAND theoretisch erklärten Geistern, die auf beiden Seiten ihrer Hauptlinie sich gruppieren, noch andere vorkommen in großer Entfernung von der Hauptlinie. Das war ja nun auch nach der ROWLANDSchen Erklärung möglich. Es konnten in der FOURIERSchen Entwicklung von $f(x)$ einzelne Koeffizienten a_s auch für hohe Werte von s beträchtliche Werte haben. Wenn z. B. die m Furchen, die auf eine Umdrehung der Schraube kommen, einen nach je 5 Furchen wiederkehrenden periodischen Fehler zeigen, so wurden in der FOURIERSchen Entwicklung die Koeffizienten a_s für $s = \frac{m}{5}, \frac{2m}{5}, \frac{3m}{5}, \frac{4m}{5}$ beträcht-

liche Werte haben, vorausgesetzt, daß m durch s teilbar ist. Oder wenn diese Voraussetzung nicht erfüllt ist, so haben diejenigen Koeffizienten a_s beträchtliche Werte, für welche die ganze Zahl s den nicht ganzzahligen Werten $\frac{m}{5}, \frac{2m}{5}, \frac{3m}{5}, \frac{4m}{5}$ nahekommt. Diese Geister mußten aber immer auf solche Stellen des Spektrums fallen, für die $\nu m \tau$ eine ganze Zahl ist, d. h. auf die Stellen, wie sie einem Gitter mit der Periode einer Schraubenumdrehung zukommen. Das ist aber bei den von LYMAN entdeckten Geistern nicht der Fall. Bei einem Gitter z. B., bei dem 750 Furchen auf eine Schraubenumdrehung kommen, finden sich die LYMANschen Geister an den Stellen eines Spektrums, die einer Periode von 175 Furchen entsprechen. Wenn wir diese Zahl 175 an die Stelle von $m = 750$ treten lassen und nun einen mit der neuen Periode sich wiederholenden Fehler der Furchen mit $f(\nu)$ bezeichnen und in eine FOURIERSche Reihe entwickeln, so wurden wir, um die auftretenden Geister zu erklären, anzunehmen haben, daß a_s für $s = 67$ und $72, 103$ und 108 , ferner für 138 beträchtliche Werte hatte. Es ist bemerkenswert, daß diese Werte von s die Eigenschaft haben, daß $s/175$ nahe bei $2/5 = 70/175$, $3/5 = 105/175$ und $4/5 = 140/175$ liegen, so daß man vermuten muß, daß eine Periode von 5 Furchen außerdem noch eine Rolle spielt. Warum aber die Zwischenwerte, z. B. $s = 68, 69, 70, 71$, keine Rolle spielen, ist nicht ersichtlich. Auch ist nicht bekannt, woher die Periode von 175 Furchen stammt.

Man konnte auch an eine andere Art von periodischen Fehlern denken, bei denen nicht die Lage der Furchen, sondern ihre Gestalt periodisch geändert wurde. Auch diese wurden sowohl ROWLANDSche wie LYMANsche Geister erzeugen können. Man kann sich das so klar machen. Bei einem vollkommenen Gitter wurde die Amplitude an einer Stelle des Spektrums die Form haben

$$a \frac{\sin(n\nu\tau\pi)}{\sin(\nu\tau\pi)},$$

wie oben gezeigt wurde. Ist m ein Teiler von n , so können wir diese Amplitude auch schreiben

$$a \frac{\sin(m\nu\tau\pi)}{\sin(\nu\tau\pi)} \frac{\sin(n\nu\tau\pi)}{\sin(m\nu\tau\pi)}$$

oder

$$A \frac{\sin(n\nu\tau\pi)}{\sin(m\nu\tau\pi)}, \quad \text{wo} \quad A = a \frac{\sin(m\nu\tau\pi)}{\sin(\nu\tau\pi)}$$

d. h. wir können das Gitter auffassen als eine n/m malige Wiederholung der Gruppe von m Furchen. Im Spektrum aber verschwinden durch die Beschaffenheit dieser Gruppe alle Ordnungen mit Ausnahme der m ten, $2m$ ten usw. Wird nun diese Gruppe von m Furchen periodisch gestört, sei es nun, daß ihre Abstände oder ihre Formen nicht die gleichen bleiben, so wird A nicht mehr an denselben Stellen verschwinden wie vorher, und es können die vorher durch das Verschwinden von A ausgelöschten Ordnungen wieder auftauchen. Bei den ROWLANDSchen Geistern ist die Periode der m Furchen durch eine ganze Umdrehung der Schraube gegeben, und die Störung ist von der Art, daß nur die Ordnungen in der Nähe der m ten, $2m$ ten usw. auftauchen. Bei den LYMANschen Geistern weicht die Periode der m Furchen von der Periode der Schraubenumdrehung ab, und die Störung ist von anderer Art, so daß die auftauchenden Ordnungen nicht notwendig in der Nähe der m ten, $2m$ ten usw. liegen.

Bei Beobachtungen mit dem Auge erkennt man LYMANsche Geister daran, daß ihre Farbe nicht an die betreffende Stelle des Spektrums paßt. Um sie auch bei photographischen Aufnahmen zu erkennen, bringt man vor dem Spalt ein Prisma an, dessen brechende Kante senkrecht zum Spalt liegt. Das Spektrum

eister Ordnung liegt dann nicht mehr in gleicher Höhe wie ohne das Prisma, sondern schrag und trennt sich von dem Spektrum zweiter Ordnung, das natürlich bei der gleichen Wellenlänge dieselbe Höhe haben muß wie die erste Ordnung. Aber diese Wellenlänge in der zweiten Ordnung koinzidiert mit der doppelten Wellenlänge in der ersten Ordnung, die dort also eine ganz andere Höhe hat. Ebenso trennen sich die höheren Ordnungen voneinander. Die LYMANschen Geister haben dazwischen die ihrer Wellenlänge entsprechende besondere Höhe. Beim Konkavgitter wird dabei am besten der Astigmatismus durch die oben besprochene Methode beseitigt. Sonst kann man infolge des Astigmatismus kleinere Höhenunterschiede des Spektrums nicht unterscheiden.

45 Apparate mit großem Gangunterschied aufeinanderfolgender Strahlenbündel. Bei den Gittern ist in der Regel der Furchenabstand so klein, daß hohe Ordnungen nicht vorkommen und ein großes Auflösungsvermögen nur durch eine entsprechend große Anzahl von Furchen erreicht wird. Bei einer anderen Klasse von Spektralapparaten ist die Zahl der interferierenden Strahlenbündel viel kleiner, dafür aber der Gangunterschied zweier aufeinanderfolgender entsprechend größer. Sie wirken wie ein Gitter mit großem Furchenabstand, bei dem ein Spektrum hoher Ordnung fast das ganze Licht vereinigt.

46 Das Stufengitter, Echelon. Der erste Apparat dieser Art ist das von MICHELSON erfundene Stufengitter (Echelon spectroscopie). Es besteht aus einer Anzahl planparalleler Glasplatten von genau gleicher Dicke. Durch Interferenzmethoden kann die Planparallelität und die Dicke bis auf kleine Bruchteile einer Wellenlänge geprüft werden. Die Platten werden treppenförmig angeordnet, so daß auf der einen Seite jede folgende ein gleich großes Stück der vorhergehenden frei läßt, während auf der anderen Seite alle gleich abschneiden (Abb 17). Die Zahl der Platten geht bei den neuesten von A. HUGGER in London angefertigten Instrumenten bis auf 50. Paralleles, auf die Grundplatte senkrecht auffallendes Licht teilt sich entsprechend den n Platten in $n + 1$ Strahlenbündel, von denen das erste keine, das zweite nur die erste Platte, das dritte die zwei ersten usw., das $n + 1$ te alle n Platten durchsetzt. Ist c die Lichtgeschwindigkeit in der Luft, v die Lichtgeschwindigkeit im Glase und d die Dicke einer Glasplatte, so ist das zweite Lichtbündel gegen das erste um die Zeit $\tau = \frac{d}{v} - \frac{d}{c}$ verzögert, ebenso das dritte gegen das zweite um dieselbe Zeit usw. bis zum letzten. Werden die $n + 1$ austretenden Lichtbündel durch eine Sammellinse in einem Punkte B vereinigt, so ist die hier entstehende Lichtbewegung durch die Superposition der $n + 1$ Strahlenbündel gegeben, und die Amplitude wird, wie oben (Ziff 6) gezeigt,

$$a \frac{\sin(N\tau\pi)}{\sin(\tau\pi)} \quad (N = n + 1)$$

Für Strahlenbündel, die im Glase dieselbe Richtung senkrecht zu den Platten haben, aber in einer anderen Richtung austreten (Abb 18), ist

$$\tau = \frac{d}{v} - \frac{d}{c} \cos \vartheta + \frac{s}{c} \sin \vartheta,$$

wo ϑ den Winkel mit der Senkrechten und s die Breite einer Stufe bedeutet. Für kleine Richtungsabweichungen ϑ kann τ als lineare Funktion von ϑ angesehen werden. Wir erhalten also auch in jeder benachbarten Richtung n Strahlen-

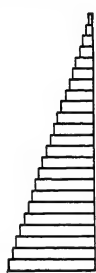


Abb 17
Das Stufengitter

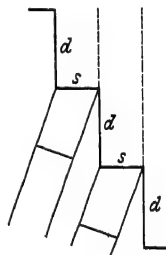


Abb 18 Gangunterschied beim Stufengitter

bündel, die durch die Sammellinse in einem anderen Punkte B vereinigt werden und dort eine Lichtbewegung von der Amplitude

$$a \frac{\sin(N\nu\tau\pi)}{\sin(\nu\tau\pi)}$$

ergeben. Die Punkte B bilden also eine Kurve, langs der sich τ ungefähr linear mit dem Richtungswinkel ϑ verändert. Der Faktor a wird dabei aber für $\vartheta = 0$ seinen größten Wert haben und nach beiden Seiten hin rasch abnehmen. Die Abnahme hängt von der Stufenbreite ab. Das erste Minimum liegt bei $\sin\vartheta = \lambda/s$. Für eine gegebene Farbe erhalten wir auf der Kurve der Punkte B an den Stellen Maxima der Intensität, wo $\nu\tau$ gleich einer ganzen Zahl wird, genau wie bei einem Gitterspektrum an den Stellen, wo die Lichtbündel um die Zeit τ gegeneinander verzögert sind. Je dicker man die Glasplatten macht, um so größer wird τ und um so größer werden damit für ein gegebenes ν die ganzen Zahlen, denen $\nu\tau$ in den Intensitätsmaximis gleich wird.

Für kleine Werte von ϑ ist nach der obigen Formel genähert

$$\tau = \tau_0 + \frac{\lambda}{c} \vartheta,$$

wenn wir mit τ_0 den Wert von τ für $\vartheta = 0$ bezeichnen. Die Richtungen, für die a einen beträchtlichen Wert hat, liegen für eine gegebene Wellenlänge λ zwischen $\vartheta = -\lambda/s$ und $\vartheta = +\lambda/s$, also zwischen

$$\tau = \tau_0 - \lambda/c \quad \text{und} \quad \tau = \tau_0 + \lambda/c$$

oder

$$\tau = \tau_0 - 1/\nu \quad \text{und} \quad \tau = \tau_0 + 1/\nu$$

Nur dieser kleine Teil des Spektrums, an dessen Rändern a schon gleich Null wird, kommt für die Beobachtung in Frage. In diesem Teil des Spektrums läuft $\nu\tau$ von $\nu\tau_0 - 1$ bis $\nu\tau_0 + 1$. Zwischen diesen Grenzen können nicht mehr als zwei ganzzahlige Werte von $\nu\tau$ liegen. Das Licht der Schwingungszahl ν wird also zwei Spektrallinien hervorgerufen, deren Ordnungen die beiden dem Werte $\nu\tau_0$ benachbarten ganzen Zahlen sind. Von diesen beiden Spektrallinien ist diejenige die stärkere, deren Ordnungszahl dem Werte $\nu\tau_0$ am nächsten kommt. Erreicht ihre Ordnungszahl den Wert $\nu\tau_0$, so verschwindet die zweite Spektrallinie.

Man kann auch das einfallende Licht einen Winkel mit der Plattennormalen machen lassen. Dann sind die Betrachtungen ganz ähnlich durchzuführen. τ_0 ist dann die Verzögerung in der schrägen Richtung und für ϑ tritt die Abweichung von der schrägen Richtung ein. Auf diese Weise kann man durch geringe Drehung des Stufengitters die zu beobachtende Spektrallinie immer in die Mitte des Feldes bringen, so daß sie nur in einer Ordnung auftritt.

Wenn sich beim Stufengitter die verschiedenen Ordnungen, in denen die verschiedenen im einfallenden Licht enthaltenen Farben sichtbar werden, nicht durcheinandermischen sollen, so muß noch ein zweiter farbenzerstreuender Apparat angewendet und durch eine geeignete Blende nur Licht von hinreichend einheitlicher Farbe in das Stufengitter hineingelassen werden, damit kein Zweifel darüber obwaltet, welche der erscheinenden Linien zu gleichen Ordnung gehören. Sonst kann es z. B. leicht eintreten, daß beim Beobachten einer Spektrallinie ein Begleiter, der auf der Seite kleinerer Wellenlängen erscheint, in Wirklichkeit von größerer Wellenlänge ist und nur in der nächstniedrigeren Ordnung beobachtet wird.

Um hier Irrtümer zu vermeiden, kann man einen zweiten hinreichend dispergierenden Apparat anbringen, dessen Spektrum senkrecht zum ersten verläuft. Die Spaltbilder gleicher Wellenlängen liegen dann auf derselben Höhe, während die Spaltbilder größerer oder kleinerer Wellenlänge die einen höher,

die anderen tiefer abgelenkt werden, wie schon oben bei der Betrachtung der LYMANschen Geister bemerkt wurde. Es kommt vor, daß durch die Fehler eines Apparates schwache Begleiter einer Spektrallinie („Geister“) vorgetauscht werden, die in Wirklichkeit die gleiche Farbe wie die Spektrallinie selbst besitzen. Auch diese machen sich bei geklärten Spektren dadurch kenntlich, daß sie im zweiten Spektrum ebenso abgelenkt werden wie die Hauptlinie.

In neuerer Zeit sind von HILGER, London, und BERNHARD HALL Nachf., Berlin, auch Reflexionsstufengitter hergestellt worden. Diese Instrumente, ebenfalls schon von MICHELSON angegeben, sind wesentlich schwerer herzustellen als die Stufengitter für Durchsicht. Vorteilhaft wird für die Herstellung Quarz verwendet.

47 Prinzip der Interferenzspektroskope von LUMMER und von FABRY und PEROT Während MICHELSON zur Erzeugung der $n + 1$ miteinander interferierenden Strahlenbuschel n verschiedene planparallele Platten benutzt, sind zwei andere Apparate, der eine von LUMMER, der andere von PEROT und FABRY konstruiert worden, bei denen nur eine planparallele Platte verwendet wird, an deren Grenzen wiederholte Spiegelungen des Lichtes auftreten, durch die aus einem Strahlenbuschel n Strahlenbuschel hervorgehen, von denen wieder je zwei aufeinanderfolgende denselben Gangunterschied haben. Der Unterschied gegen die Gitter (einschließlich des Stufengitters) besteht im wesentlichen darin, daß bei jeder Spiegelung die Amplitude der Lichtschwingung in einem gewissen Verhältnis vermindert wird. An die Stelle der oben betrachteten Summe der $n + 1$ Lichtbewegungen von gleicher Amplitude tritt eine Summe von der Form

$$a \sin \nu t 2\pi + a k \sin \nu(t + \tau) 2\pi + a k^2 \sin \nu(t + 2\tau) 2\pi + \dots + a k^n \sin \nu(t + n\tau) 2\pi,$$

die sich also dadurch von der früher betrachteten Summe unterscheidet, daß jede folgende Amplitude das k -fache der vorhergehenden ist, wobei k ein echter Bruch ist. Wir können auch diese Summe als imaginären Teil einer geometrischen Reihe betrachten

$$a e^{i 2\pi \nu t} (1 + q + q^2 + \dots + q^n) = a e^{i 2\pi \nu t} \frac{q^{n+1} - 1}{q - 1}, \quad (N = n + 1)$$

wo $q = k e^{i 2\pi \nu \tau}$. Die Glieder q^n können wir uns wieder wie oben durch Vektoren in der komplexen Zahlenebene dargestellt denken, wobei gegen früher der Unterschied besteht, daß hier die Vektoren nicht gleich lang sind. Aber es bleibt die Tatsache, daß die Amplitude der resultierenden Bewegung am größten ist, wenn alle Vektoren die gleiche Richtung haben, d. h. wenn $\nu \tau$ eine ganze Zahl ist.

$$\frac{q^{n+1} - 1}{q - 1} = \frac{k^{n+1} e^{i 2\pi \nu (n+1)\tau} - 1}{k e^{i 2\pi \nu \tau} - 1} \quad (N = n + 1)$$

Man wird es nun so einzurichten haben, daß auch die schwachste der N Lichtbewegungen für die Interferenz noch eine Rolle spielt, d. h. man wird versuchen, den Wert von k der Eins möglichst nahezubringen, so daß selbst k^n noch in Betracht kommt. Dann wird die Wirkung ähnlich sein wie bei einem Gitter von n Rinnen und dem Gangunterschied $c\tau$ zwischen zwei aufeinanderfolgenden Lichtbündeln.

48 Die LUMMER-Platte Bei der von LUMMER gefundenen „LUMMERschen Platte“¹ ist dies in einer von GEHRCKE angegebenen Weise erreicht. Auf das eine Ende einer rechteckigen planparallelen Glasplatte wird ein rechteckiges Prisma aufgekittet (Abb 49), auf dessen Hypotenusenfläche Licht in

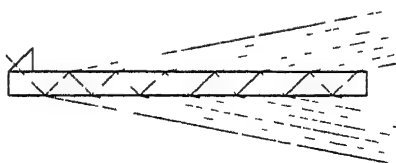


Abb 49 LUMMER-GEHRCKE-Platte

solcher Richtung auffällt, daß es, in die Platte eindringend, beinahe unter dem Winkel

¹ O. LUMMER, Verh. Dtsch. Phys. Ges. 3, S. 85 (1901), Phys. Z. 3, S. 172 (1902)

totaler Reflexion auf die gegenüberliegende Seite der Platte fällt. Der größte Teil des Lichtes wird reflektiert, und ein kleiner Bruchteil tritt beinahe streifend aus. Der reflektierte Teil fällt zurück auf die andere Seite der Platte und wird hier wiederum zum größten Teil reflektiert, während ein kleiner Bruchteil auf dieser Seite austritt usw. Auf diese Weise treten auf beiden Seiten eine Reihe von Strahlenbündeln aus, von denen jedes einen gegebenen Gangunterschied gegen das folgende hat. Vereint man sie durch eine Sammellinse in einem Punkte B , so entsteht dort eine namhafte Lichtbewegung, wenn $\nu\tau$ gleich einer ganzen Zahl ist, die der Ordnung beim Gitter entspricht. Je dicker die Glasplatte, desto größer ist τ , desto höher ist also die Ordnungszahl. Die auflösende Kraft wird, wenn man der totalen Reflexion hinreichend nahe ist, nahezu gleich dem Produkte der Ordnungszahl mit der Anzahl der auf einer Seite auftretenden Strahlenbuschel erhalten. Bei einer Platte von 1 cm Dicke erhält man für gelbes Licht etwa die Ordnung 10000, so daß bei etwas über 10 Strahlenbündeln zwei Linien noch getrennt werden, deren Wellenlängen um $\frac{1}{10} \cdot 10^{-5} \lambda$ voneinander abweichen.

Ebenso wie beim Stufengitter wird das Licht, ehe es in den Apparat tritt, durch ein Prisma oder Gitter zerlegt, und nur ein Teil dieses Spektrums herausgeblendet, klein genug, daß höchstens zwei aufeinanderfolgende Ordnungen gleichzeitig beobachtet werden. Mit Vorteil kann statt dessen die Methode der gekreuzten Spektren Verwendung finden. Zu diesem Zweck wird die Dispersionsrichtung der Platte senkrecht zu der eines Prismen- oder Gitterspektroskopes gestellt und eine Abbildung der Interferenzen auf dem Spalt des Spektrographen herbeigeführt.

49 Der Apparat von PEROT und FABRY Bei dem Apparat von PEROT und FABRY werden die n Strahlenbündel ebenfalls durch wiederholte Spiegelung an den Grenzflächen einer Platte erzeugt. Aber während bei der LUMMERSchen Platte nahe an den Winkel totaler Reflexion herangegangen wird, erreichen PEROT und FABRY eine kraftige Reflexion durch geeignet starke Versilberung der Grenzflächen. Sie können dadurch auch eine Luftplatte verwenden, die von planparallelen Grenzflächen zweier schwach keilförmiger Glasplatten begrenzt wird. Keilförmig sind sie deshalb, damit die an ihren äußeren Grenzflächen reflektierten Strahlen zur Seite geworfen werden. Dadurch werden auch störende Interferenzerscheinungen vermieden, die an den planparallelen Glasplatten selbst auftreten würden. Bei der LUMMERSchen Anordnung wurde eine Luftplatte nicht gut verwendet werden können, weil dann nur streifende Inzidenz eine hinreichende Reflexion geben und streifende Inzidenz eine sehr lange Platte verlangen würde, wenn die Zahl der interferierenden Strahlenbündel nicht zu klein werden soll. Doch hat LUMMER auch von dieser Anordnung bei seinem Interferenzphotometer Gebrauch gemacht. Bei der Anordnung von PEROT und FABRY kann die Richtung des Lichtes beliebig nahe an die Normale der Platte heranrücken. Das hat den Vorzug, daß auch bei einer geringen Plattengröße die Zahl der interferierenden Strahlenbündel eine beträchtliche sein kann.

Die Außenansicht eines neueren Instrumentes nach G. HANSEN in der Ausführung von CARL ZEISS, Jena, ist in Abb 20 wiedergegeben.

Laßt man Lichtwellen einer bestimmten Wellenlänge in allen möglichen Richtungen auf eine solche Platte fallen und vereint die parallel austretenden Strahlen durch eine Sammellinse in einer der Platte parallelen Fokalebene, so erscheinen in dieser Ebene eine Reihe konzentrischer heller Ringe, die einer Reihe von aufeinanderfolgenden ganzzahligen Werten von $\nu\tau$ entsprechen, wo wie oben ν die Schwingungszahl und τ das Zeitintervall bedeutet, um welches die Wellen der interferierenden Strahlenbündel gleicher Richtung jedes gegen das folgende verschoben ist. Je schräger die Strahlen durch die Platte treten, um so

geringer ist τ . Bei streifender Reflexion würde es verschwinden. In der Tat ist e die Plattendicke, α der Winkel des Strahles mit der Normalen und c die Lichtgeschwindigkeit in der Platte, so ist

$$AB + BC - CD = c\tau = \frac{2e}{\cos \alpha} - 2e \operatorname{tg} \alpha \sin \alpha = 2e \cos \alpha$$

(Abb 21) Jedem Werte von $c\tau$ entspricht demnach ein gewisser Reflexionswinkel, also ein gewisser Kegel des austretenden Lichtes und damit ein gewisser Ring in der Fokalebene, der sich mit wachsendem τ mehr und mehr zusammenzieht

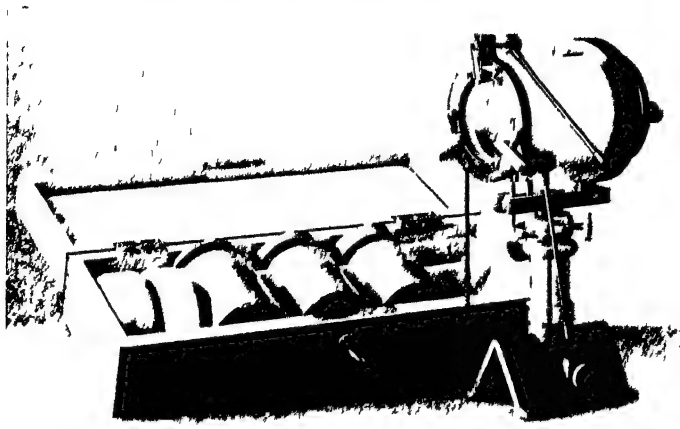


Abb 20 Interferometer nach FABRY und PEROT (CARI LIESS, Jena)

Die Sammellinse kann auch als Objektiv eines Fernrohres angesehen werden und das Okular des Fernrohres als eine Lupe, mit der man die Einzelheiten in der Fokalebene betrachtet. Die Lichtquelle wird hinreichend nahe vor die Luftplatte gelegt oder in ihr abgebildet, damit ein hinreichend großem Kegel von Lichtstrahlen die Platte durchsetzt. Haben wir es mit Licht einer Wellenlänge $\lambda = c/\nu$ zu tun, so liegen die Ringe an den Stellen

$$\nu\tau = m \quad \text{oder} \quad c\tau = 2e \cos \alpha = m c/\nu = m \lambda$$

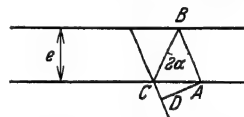


Abb 21 Gangunterschied an einer Platte

Kennt man also die Dicke e der Luftplatte, die dadurch möglichst unverändert gehalten wird, daß die Glas- oder Quarzplatten durch drei gleiche, temperaturunempfindliche Sperrkörper auseinandergehalten werden, auf die sie von drei Federn gepreßt werden, und die Ordnungszahl m eines Ringes, so kann man durch die Messung des Winkels α , den die Strahlen des Ringes mit der Normalen der Platte bilden, die Wellenlänge bestimmen.

PEROT und FABRY haben auch ein Interferometer konstruiert, bei dem die beiden Glasplatten, zwischen denen die Luftplatte liegt, so verschoben werden können, daß diese beständig planparallel bleibt. Nähern sich die Glasplatten einander, so ziehen sich die Interferenzringe zusammen. Jeder Ring geht schließlich in ein Scheibchen über und verschwindet dann im Zentrum, während vom Rande des mit dem Fernrohr überblickten Feldes Ringe niedrigerer Ordnungszahl herausrücken. Entfernen sich die Glasplatten voneinander, so tauchen aus dem Zentrum immer neue Scheibchen auf und erweitern sich zu Ringen, während die äußersten Ringe aus dem Felde des Fernrohres herausrücken. Durch Abzählen der Ringe, die im Zentrum aufgetaucht sind, läßt sich auf diese Weise die Änderung der Entfernung der beiden Glasplatten in Wellenlängen messen,

und umgekehrt durch die Kenntnis, um wieviel die Entfernung der Glasplatten geändert ist, und durch das Abzählen der Ringe die aufgetaucht sind, kann man die Wellenlänge des Lichtes bestimmen. Denn wenn für zwei Dicken e_1 und e_2 zwei Ringe mit den Ordnungszahlen m_1 und m_2 sich gerade in der Mitte zusammengezogen haben, so ist für beide $\alpha = 0$ und daher

$$2(e_2 - e_1) = (m_2 - m_1) \lambda$$

Auf ähnliche Weise haben MICHELSON und MORLEY und später noch einmal MICHELSON und BENÖT mit dem von MICHELSON konstruierten Interferometer die Wellenlänge der roten Kadmiumlinie bestimmt. Hierbei wurden allerdings nur zwei Strahlenbündel miteinander zur Interferenz gebracht, es fehlte also die „Gitterwirkung“, der man scharfe Interferenzringe zu verdanken hat. Die wesentliche Verbesserung des Apparates von PEROT und FABRY besteht eben darin, daß durch die Versilberung der Grenzflächen die Zahl der interferierenden Strahlenbündel viel größer ist und dadurch die Scharfe der Interferenzringe ganz wesentlich gesteigert wird.

Die Leistungsfähigkeit des PEROT-FABRYSchen Apparates hängt in erster Linie von einem guten Reflexionsvermögen der Platten ab. Ursprünglich wurde chemisch, später durch Kathodenzerstäubung versilbert. Für das ultraviolette Gebiet eignet sich aber Silber schlecht, es wird deshalb ein Nickelfilm vorgezogen. Durch ein von HOCHHEIM angegebenes Verfahren kann man neuerdings einen Aluminium-Silberfilm aufdampfen, der auch im Ultraviolett ein hohes Reflexionsvermögen besitzt.

Gesetzt, es werde ein Ring der m ten Ordnung beobachtet, so entspricht dem nächst kleineren Ring die $m - 1$ te und dem nächst größeren die $m + 1$ te Ordnung. Das Licht habe die Wellenlänge λ . Läßt man nun außer diesem Licht noch weiteres Licht von etwas größeren oder kleineren Wellenlängen λ' in den Apparat hinein, die sich aber um nicht mehr als etwa $\frac{1}{3} \frac{\lambda}{m}$ nach oben und nach

unten von λ unterscheiden sollen, so haben dessen Ringe m ter Ordnung für $\lambda' < \lambda$ etwas größere Radien als der Radius des Ringes m ter Ordnung von λ und für $\lambda' > \lambda$ etwas kleinere. Sie erreichen aber natürlich nicht die Ringe $m - 1$ ter und $m + 1$ ter Ordnung der Wellenlänge λ . Denn für diese mußte ja

$$m \lambda' = (m \mp 1) \lambda,$$

d. h.

$$\lambda' = \lambda \mp \frac{\lambda}{m},$$

der Unterschied der Wellenlänge also dreimal so groß sein. Diese Ringe m ter Ordnung stellen dann also ein Stück des Spektrums von $\lambda - \frac{1}{3} \frac{\lambda}{m}$ bis $\lambda + \frac{1}{3} \frac{\lambda}{m}$ dar. Wenn die Reflexion der Silberschichten so abgepaßt ist, daß alle diese Ringe durch die Interferenz einer beträchtlichen Anzahl von Strahlenbündeln zustande kommen, so wird dieses Stück des Spektrums noch feine Einzelheiten zeigen, deren Breite klein gegen seine eigene Breite $\frac{2}{3} \frac{\lambda}{m}$ ist. Dabei kann es sich natürlich auch um Absorptionslinien handeln, die einen leuchtenden Hintergrund unterbrechen. Ist z. B. die Luftplatte 3 mm dick, so ist für eine Wellenlänge von 6000 Å die Ordnung der Ringe von maßigem Radius nahezu gleich 10000 und das betrachtete Stück des Spektrums also etwa 0,4 Å breit. Eine Stelle dieses Spektrums ist dann sehr wohl mit einer Genauigkeit von 0,001 Å bestimmbar, wenn auch zwei Linien, die getrennt wahrgenommen werden sollten, erheblich weiter voneinander getrennt sein mußten. Dasselbe Stück des Spektrums sehen wir dann auch in der Umgebung der benachbarten Ringe in anderen Ordnungen.

Wird ein größeres Intervall von Lichtwellen zugelassen, so dehnen sich alle diese Spektren aus und fangen an, übereinanderzugreifen, genau wie bei den anderen auf Interferenz von n Strahlenbündeln beruhenden Apparaten

Der Wellenlängenunterschied $\Delta\lambda = (\lambda' - \lambda)$ zweier Linien λ und λ' , der gerade hinreicht, um das Ringsystem von λ' gegen das von λ um eine Streifenbreite zu verschieben, wird als „nutzbares Spektralgebiet“ oder als „Dispersionsgebiet“ bezeichnet. Seine Größe ergibt sich daraus, daß in diesem Falle die Ordnung m der Wellenlänge λ' zusammenfällt mit der Ordnung $(m + 1)$ von λ . Es gilt also

$$m\lambda' = (m + 1)\lambda, \quad \text{somit} \quad m(\lambda' - \lambda) = \lambda$$

und

$$\lambda = \frac{\lambda^2}{m} = \frac{\lambda^2}{2e}, \quad (\text{da ja } m\lambda \approx 2e)$$

wo e die Dicke der Luftplatte ist

Für eine Wellenlänge von 6000 Å beträgt also das Dispersionsgebiet bei einem Plattenabstand von 10 mm 0,180 Å

Von der Verwendbarkeit interferometrischer Methoden zur Untersuchung von Absorptionsspektren (Sonnenspektrum) wird weiter unten (Ziff. 53) gehandelt

Der Maßstab in einem solchen Spektrum *mit* Ordnung ist nicht konstant. Nennen wir den in der Fokalebene gemessenen Radius R und die Brennweite der Sammellinse f , so daß

$$R = f \tan \alpha,$$

so finden wir, da

$$2e \cos \alpha = m\lambda,$$

$$\begin{aligned} d\lambda &= -\frac{2e}{m} \sin \alpha \cos^2 \alpha \, d\alpha \\ &= -\frac{2e}{m} \frac{R/f}{(f^2 + R^2)^{3/2}} dR \end{aligned}$$

Die Dispersion des Spektrums ist also

$$-\frac{dR}{d\lambda} = \frac{m(f^2 + R^2)^{3/2}}{2eRf}$$

und damit unendlich für $R = 0$ und Null für $R = \infty$. In der Regel ist R^2 gegen f^2 zu vernachlässigen, d. h. es werden nur Winkel α in Betracht kommen, die wenige Grade nicht übersteigen. Dann kann man

$$R = f \alpha \quad \text{und} \quad \lambda = \frac{2e}{m} \left(1 - \frac{R^2}{2f^2}\right)$$

setzen oder, wenn für $R = R_0$ die Wellenlänge $\lambda = \lambda_0$ ist

$$\lambda_0 - \lambda = \frac{e}{mf^2} (R^2 - R_0^2),$$

und da aus

$$2e \cos \alpha = m\lambda,$$

folgt, daß bis auf Größen von der Ordnung α^2

$$2e = m\lambda,$$

so kann man auch schreiben

$$\lambda_0 - \lambda = \frac{\lambda}{2f^2} (R^2 - R_0^2)$$

Gleichen Änderungen von R^2 werden dann also in dem betrachteten Spektrum *mit* Ordnung gleiche Änderungen der Wellenlänge entsprechen, aber nicht gleichen Änderungen von R . Das muß bei der Bestimmung von Wellenlängendifferenzen innerhalb des Spektrums wohl berücksichtigt werden

Auch ohne Kenntnis der Brennweite f des abbildenden Systems läßt sich die Wellenlangendifferenz $\lambda_0 - \lambda$ zweier eng benachbarter Spektrallinien durch die Vermessung des jeder Spektrallinie zugehörigen Ringsystems bestimmen. Werden die zur Wellenlänge λ gehörigen Radien mit R , die zu λ_0 gehörigen mit r bezeichnet, so gelten folgende Zuordnungen

Ordnungszahl	λ	λ_0
m	R_m	r_m
$m - 1$	R_{m-1}	r_{m-1}
$m - 2$	R_{m-2}	r_{m-2}

Es gilt dann nach der Grundformel der PEROT-FABRY-Platte

$$\lambda = \frac{2e}{m} \left(1 - \frac{R_m^2}{2f^2} \right), \quad \lambda_0 = \frac{2e}{m} \left(1 - \frac{r_m^2}{2f^2} \right),$$

$$\lambda = \frac{2e}{m-k} \left(1 - \frac{R_{m-1}^2}{2f^2} \right), \quad \lambda_0 = \frac{2e}{m} \left(1 - \frac{R_{m-1}^2}{2f^2} \right)$$

Hieraus folgt einerseits

$$\frac{R_{m-1}^2 - R_m^2}{k} = \lambda \frac{f^2}{e} = \text{const}_1, \quad \frac{r_m^2 - r_{m-1}^2}{k} = \lambda_0 \frac{f^2}{e} = \text{const}_2$$

und andererseits

$$\lambda_0 - \lambda = \frac{e}{mf^2} (R_m^2 - r_m^2) = \frac{\lambda}{2f^2} (R_m^2 - r_m^2)$$

Unter Verwendung der zuerst gewonnenen Folgerung läßt sich f^2 eliminieren, und es ergibt sich

$$\lambda_0 - \lambda = \frac{1}{2e} \frac{R_m^2 - r_m^2}{N} \lambda^2,$$

wo der Nenner $N = \frac{R_{m-1}^2 - R_m^2}{k} = \frac{R_m^2 - r_m^2}{k}$ ist

Ist aus dem Ringsystem die spektroskopisch oft wichtigere Differenz der Wellenzahlen abzuleiten, so ergibt sich analog

$$\nu - \nu_0 = \frac{1}{2e} \frac{R_m^2 - r_m^2}{N}$$

Wichtig ist natürlich die richtige Kombination der Radien gleicher Ordnungszahl R und r , wozu im allgemeinen eine Vermessung der Ringsysteme bei zwei verschiedenen Distanzen dienlich ist

50 Koinzidenzmethode Ebenso wie bei dem ROWLANDSchen Konkavgitter durch die Überlagerung von Spektren verschiedener Ordnung das Verhältnis zweier Wellenlangen mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann, so kann dasselbe auch mit dem Stufengitter, der LUMMER-Platte und der LUT-Platte von PEROT und FABRY geschehen. Mit dem Stufengitter und der LUMMER-Platte wurde man allerdings auf diese Weise die Wellenlangenverhältnisse in dem betreffenden Glase finden, während die Spektroskopie sie in Luft verlangt. Die schwache Dispersion der Luft ist jetzt genau genug bekannt¹, um die Wellenlangenverhältnisse dann auch auf das Vakuum zu übertragen

¹ MEGGERS u PETERS, Measurements of the Index of Refraction of Air for Wavelengths from 2218 to 9000 Å. Sc Pap Bur of Stand Oct 1918, Nr 327

Mit dem Apparat von PLEOI und FABRY verfährt man so, daß man das Licht der beiden Wellenlängen λ und λ' nacheinander in den Apparat einfallen läßt und das eine Mal den Radius eines Ringes, das andere Mal den Radius eines nahezu gleich großen Ringes mißt. Wenn man nun die eine Wellenlänge λ und die Ordnungszahl m des zugehörigen Ringes schon kennt, so kann man in dem Spektrum mit der Ordnung, das sich auf beiden Seiten dieses Ringes zeigen würde, wenn man λ sich verändern ließe, die Wellenlänge $\lambda + \Delta\lambda$ der Stelle bestimmen, die gerade an die Stelle des Ringes der Wellenlänge λ' fällt. Nach dem Obigen ist dann

$$-1\lambda = \frac{\lambda}{2f^2}(R'^2 - R^2),$$

wenn R der zu λ und R' der zu λ' gehörige Radius ist. Jetzt fällt der Ring von λ' mit dem fingierten Ring von $\lambda + \Delta\lambda$ zusammen. Ist daher m' die Ordnungszahl des Ringes von λ' , so muß der Gangunterschied $m'\lambda'$ gleich $m(\lambda + \Delta\lambda)$ sein, d. h.

$$\lambda' = \frac{m}{m'}\lambda \left(1 + \frac{R^2}{2f^2} - \frac{R'^2}{2f^2}\right)$$

Es bleibt also nur noch übrig, die Ordnungszahl m' zu bestimmen. Man kann nun annehmen, daß die Wellenlänge λ' ebenfalls mit beträchtlicher Genauigkeit (von vielleicht ein Dreißigtausendstel od. dgl.) bekannt ist, so daß m' mit derselben Genauigkeit aus der Gleichung

$$m'\lambda' = m(\lambda + \Delta\lambda)$$

berechnet werden kann. Da m' nun eine ganze Zahl ist, so braucht man ihr nur bis auf einen Betrag, der kleiner ist als $\frac{1}{2}$, nahe zu sein, um den genauen Wert zu kennen. Wenn in diesem Falle also m' von der Ordnung 10000 und auf ein Dreißigtausendstel ermittelt wäre, so würde es damit genau bekannt sein.

Auch den Wert der ganzen Zahl m kann man in ähnlicher Weise durch Anwendung von Licht mehrerer bekannter Wellenlängen ermitteln. Gesetzt, die Dicke d der Luftplatte von etwa 3 mm wäre bis auf 0,01 mm bekannt, so wäre damit aus der Gleichung

$$2d \cos \alpha = m\lambda$$

z. B. für $\lambda = 6000 \text{ \AA}$ der Wert von m ungefähr gleich 10000 ± 34 bekannt. Bestimmt man nun für eine andere Wellenlänge λ' in der eben besprochenen Weise die Wellenlänge $\lambda + \Delta\lambda$, die in m ter Ordnung mit ihr koinzidiert, so erhält man

$$m' = m \frac{\lambda + \Delta\lambda}{\lambda'}, \quad \left(\Delta\lambda = \frac{R^2 - R'^2}{2f^2}\right)$$

wobei wir die Genauigkeit von $\frac{\lambda + \Delta\lambda}{\lambda'}$ so hoch voraussetzen können, daß der Fehler von $m \frac{\lambda + \Delta\lambda}{\lambda'}$ klein gegen 1 ist. Jetzt suchen wir aus den 69 Werten von m des Intervalles 10000 ± 34 diejenigen aus, für die $m \frac{\lambda + \Delta\lambda}{\lambda'}$ nicht mehr, als die Fehlergrenzen es erlauben, von einer ganzen Zahl abweicht. Gesetzt, es ergeben sich für zwei Werte m_1, m_2 zwei ganzzahlige Werte von $m \frac{\lambda + \Delta\lambda}{\lambda'}$ und es wäre $\frac{\lambda + \Delta\lambda}{\lambda'}$ gleich einer ganzen Zahl, vermehrt oder vermindert um einen Bruch ϵ , so mußten auch $m_1\epsilon$ und $m_2\epsilon$ ganze Zahlen sein und damit auch $(m_2 - m_1)\epsilon$, folglich die Differenz zwischen m_1 und m_2 min-

destens gleich $1/\varepsilon$. Ware also in unserem Falle $\varepsilon < 1/69$, so könnte es in dem betrachteten Intervall nur eine Zahl m geben, für die $m \frac{\lambda + 1\lambda}{\lambda'}$ einen ganzzahligen Wert hat

Ist ε dagegen nicht klein genug, um das Auftreten mehrerer Werte von m auszuschließen, und werden mehrere Werte gefunden, für die $m \frac{\lambda + 1\lambda}{\lambda'}$ um nicht mehr von einer ganzen Zahl abweicht, als die Fehlergrenzen es erlauben, so hat man dasselbe Verfahren an Stelle von λ' noch mit anderen Wellenlängen zu wiederholen und denjenigen Wert m auszusuchen, der in allen Fällen eine ganze Zahl für die Ordnung des betrachteten Ringes der betreffenden Wellenlänge liefert

Wir haben in unserem Beispiel vorausgesetzt, daß die Dicke der Luftschicht auf $1/300$ ihres Betrages bekannt sei. Man sieht leicht, daß man auch mit einem viel groberen Näherungswert auskommt, wenn das Verhältnis $\frac{\lambda + 1\lambda}{\lambda'}$ einer ganzen Zahl entsprechend nahe kommt. Mit m ist dann auch ε mit hoher Genauigkeit gefunden

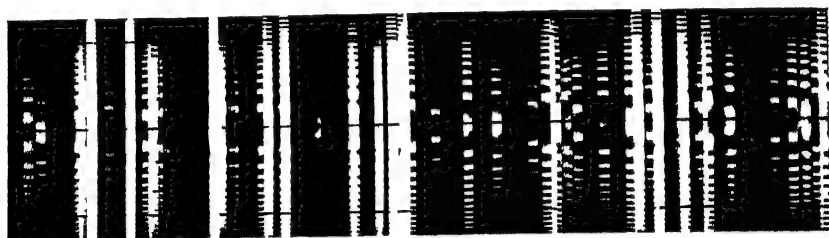


Abb 22 Spektrum mit Interferenzen einer planparallelen Luftplatte

Um also eine Wellenlänge λ' auf eine schon bekannte Wellenlänge λ zu beziehen, hat man nur nötig, den Durchmesser ρ eines von den Ringen zu messen, die von den beiden Farben in der Fokalebene der hinter der Luftplatte stehenden Linse entworfen werden. Mit der Brennweite der Linsen bestimmen die Durchmesser die Winkel der die Luftplatte durchsetzenden Strahlen mit der Plattennormalen. Man bringt zu dem Ende den Spalt eines stigmatischen Spektroskops in der Fokalebene so an, daß er durch das Zentrum der Ringe läuft. Im Spektrum zeigen sich dann die Linien durch dunkle Intervalle unterbrochen. Die hellen Teile entsprechen den Teilen des Spaltes, über die die Ringe laufen. Indem man nun den Maßstab der Abbildung des Spaltes in den Spektrallinien bestimmt, hat man die Mittel in der Hand, für jede Spektrallinie den wahren Durchmesser des betreffenden Kreises auf dem Spalt zu ermitteln und auf diese Weise die Verhältnisse der Wellenlängen aller auf einer Spektralaufnahme erscheinenden Farben zu messen. Eine derartige Aufnahme zeigt Abb 22

Man kann jedoch auch ohne Kenntnis des Maßstabes der Spaltabbildung und ohne die Brennweite des abbildenden Systems zu bestimmen, eine Wellenlängenbestimmung ausführen, indem man für jede Spektrallinie mehrere Ringdurchmesser ermittelt und aus ihren Werten auf die im allgemeinen nicht ganzzahlige Ordnungszahl im Zentrum der Ringe schließt. Dieses Verfahren, zuerst von ST JOHN vorgeschlagen, wurde in der Folgezeit vielfach, z B von ST JOHN und BABCOCK, ROBERTSON, CHILDS, BURNS und KIRSS, JACKSON, wegen der größeren Einfachheit angewendet. Dieses Verfahren gründet sich auf folgende Überlegung

Nach der Grundformel gilt für die Ordnungszahl eines hellen Ringes mit Radius R die Beziehung

$$m = \frac{2e}{\lambda} \left(1 - \frac{R^2}{2f^2} \right),$$

für das Zentrum des Ringsystems erhalten wir die nicht ganzzahlige Ordnungszahl

$$m_0 + \varepsilon = \frac{2e}{\lambda},$$

wo m_0 die Ordnungszahl des innersten, voll entwickelten Ringes und ε einen Bruch bedeutet, für die ersten aufeinanderfolgenden Ringe erhalten wir

$$\begin{aligned} m_0 &= \frac{2e}{\lambda} - \frac{e}{\lambda} \frac{R_0^2}{f^2}, & \text{also} & \quad \varepsilon = \frac{e}{\lambda} \frac{R_0^2}{f^2}, \\ m_0 - 1 = m_1 &= \frac{2e}{\lambda} - \frac{e}{\lambda} \frac{R_1^2}{f^2}, & \text{also} & \quad \varepsilon = \frac{e}{\lambda} \frac{R_1^2}{f^2} - 1, \\ m_0 - k = m_k &= \frac{2e}{\lambda} - \frac{e}{\lambda} \frac{R_k^2}{f^2}, & \text{also} & \quad \varepsilon = \frac{e}{\lambda} \frac{R_k^2}{f^2} - k \end{aligned}$$

Durch Messung zweier Ringe R_i und R_k erhält man also den Bruchteil ε aus den Gleichungen

$$\varepsilon + i = \frac{e}{\lambda} \frac{R_i^2}{f^2},$$

$$\varepsilon + k = \frac{e}{\lambda} \frac{R_k^2}{f^2}$$

zu

$$\varepsilon = \frac{R_i^2}{R_k^2 - R_i^2} (k - i) - i$$

oder für die Rechnung bequemer

$$\varepsilon = (R_i^2 - R_i^2) / (R_k^2 - R_i^2) - i$$

Wie sich aus den Ausgangsgleichungen erkennen läßt, sind die Differenzen aufeinanderfolgender R^2 konstant, die R_i^2 einer Linie bilden also eine arithmetische Reihe erster Ordnung, deren Differenz gleich dem Nenner in dem zuletzt gegebenen Werte für ε ist. Da die praktische Messung von vornherein die Durchmesser $2R = D$ liefert, ersetzt man selbstverständlich in der obigen Gleichung $R_{i,k}$ durch $D_{i,k}$.

Um diese Methode anzuwenden, ist es aber unumgänglich notwendig, daß als abbildendes System und auch für die Spektrographenoptik vollkommen korrigierte Systeme ohne Verzeichnungsfehler verwendet werden. Die Prüfung der Konstanz von $(D_i^2 - D_{i-1}^2)$ ist zugleich eine Prüfung für die Güte der verwendeten Optik.

Enthält eine photographische Aufnahme viele Linien, so kann man die für die verschiedenen Linien erhaltenen Werte für $(D_i^2 - D_{i-1}^2)$ als Funktion der Wellenlänge darstellen und mit einer so zu erhaltenden Ausgleichskurve die endgültigen Bestimmungen des Bruchteils ε vornehmen, die Ermittlung der ganzzahligen Werte m erfolgt ganz ähnlich wie oben geschildert. Eine eindeutige Prüfung ergibt nur die Auswertung zweier Meßreihen mit verschiedenem Abstand e , die ohnehin nötig ist, um eine Korrektur anbringen zu können, die wir bisher nicht beachtet haben und von der die folgende Ziffer ausführlich handeln wird.

51 Phasensprung bei der Reflexion Bisher ist angenommen, daß die Dicke der Luftplatte für Licht aller Wellenlängen gleich anzusetzen sei. Das ist nicht ganz richtig. Bei der Reflexion an einer Silberschicht dringt das Licht je nach seiner Wellenlänge verschieden tief ein. Man muß daher für die verschiedenen Wellenlängen die Dicke der Luftschicht etwas verschieden ansetzen, wenn die Formel

$$2e \cos \alpha = m\lambda$$

richtig bleiben soll

Für eine Wellenlänge λ_0 sei die Dicke der Luftschicht mit e_0 bezeichnet, worin die kleine, durch die Reflexion von der Silberschicht verursachte Vergrößerung der Schicht eingeschlossen sein soll. Dann ist bei derselben Stellung der Glasplatten für eine andere Wellenlänge λ an Stelle von e_0 zu setzen

$$e_0 + \delta_\lambda$$

Dabei ist δ_λ nur von λ , nicht von e_0 abhängig. δ_λ behält seinen Wert, wenn wir den Abstand der Glasplatten verändern. Dann gilt für jedes λ und jedes e_0 die Gleichung

$$2(e_0 + \delta_\lambda) \cos \alpha = m\lambda$$

Nun hatten wir oben das Verhältnis λ/λ_0 unter Vernachlässigung von δ_λ bestimmt und dadurch eine etwas fehlerhafte Wellenlänge λ ermittelt

$$2e_0 \cos \alpha = m\lambda$$

Demnach ist die wahre Wellenlänge λ gleich

$$\lambda = \bar{\lambda} \left(1 + \frac{\delta_\lambda}{e_0}\right)$$

Wenn wir also mit einer anderen Dicke e'_0 die Ermittlung wiederholen, so müssen wir einen anderen Wert λ' finden, für den die Gleichung gilt

$$\lambda = \lambda' \left(1 + \frac{\delta_\lambda}{e'_0}\right),$$

und daher ist

$$\frac{\bar{\lambda}'}{\bar{\lambda}} = \frac{1 + \delta_\lambda/e_0}{1 + \delta_\lambda/e'_0}$$

oder

$$\delta_\lambda (\bar{\lambda}/e_0 - \lambda'/e'_0) = \lambda' - \lambda$$

Um δ_λ so genau wie möglich zu finden, werden wir $\lambda' - \lambda$ so groß wie möglich zu machen suchen. Wir werden also die eine Dicke groß, die andere klein wählen. Wenn e_0/e'_0 nur ein kleiner Bruchteil ist, so ist

$$\delta_\lambda = \frac{\lambda' - \bar{\lambda}}{\lambda} e_0,$$

und da jetzt der Unterschied von λ' und λ klein ist gegen den von λ und $\bar{\lambda}$, so können wir ohne wesentliche Fehler auch schreiben

$$\delta_\lambda = \frac{\lambda - \bar{\lambda}}{\bar{\lambda}} e_0,$$

die an der Wellenlänge $\bar{\lambda}$ anzubringende Korrektur

$$\Delta\lambda = \bar{\lambda} \frac{\delta_\lambda}{e_0}$$

wird also

$$\Delta\lambda = (\lambda' - \bar{\lambda}) \frac{e'_0}{e'_0 - e_0}$$

PÉROT und FABRY empfehlen, gleichzeitig mit Licht von der Wellenlänge λ und λ_0 zu beleuchten und den Ring von λ auszusuchen, der mit dem von λ_0 zusammenfällt, so daß

$$m_0 \lambda_0 = m \bar{\lambda},$$

$$\delta_\lambda = (m \lambda - m_0 \lambda_0) \frac{d_0}{m_0 \lambda_0},$$

worin mit ausreichender Genauigkeit $\frac{d_0}{m_0 \lambda_0}$ gleich $\frac{1}{2}$ gesetzt werden kann. Sie ermitteln bei zwei besonders dicken Versilberungen gegen $\lambda_0 = 5080 \text{ \AA}$ die folgenden Dickenänderungen

λ	δ_λ	λ	δ_λ
644	$-1,4 \mu\mu$	508	$0,0 \mu\mu$
546	$2,1$	436	$+4,3$

Das wurde bei einer Dicke der Luftschicht von $d_0 = 10 \text{ mm}$ Korrekturen in ebensoviel Zehnmillionstel der Wellenlänge ergeben, als die Werte von δ Einheiten in $\mu\mu$ enthalten, in diesem Falle also Korrekturen von $-2,8$, $-1,3$, 0 , $+1,9$ Tausendstel \AA . Bei kleinerer Dicke der Luftschicht wurden die Korrekturen entsprechend größer sein. Aber man sieht, daß selbst bei dreimal größeren Korrekturen der Wert von δ nur auf 10% sicher zu sein braucht, um die Korrektur auf ein Tausendstel \AA genau zu machen.

52 Einfluß der Luftdispersion Eine weitere Korrektur kann unter Umständen notwendig werden, wenn bei verschiedenen Zuständen der Luft beobachtet wird. Bezeichnen nämlich n_λ und $n_{\lambda'}$ die Brechungs-exponenten der Luft bei den Wellenlängen λ und λ' , so sind λn_λ und $\lambda' n_{\lambda'}$ die Wellenlängen im luftleeren Raum. Mithin behält

$$\frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{n_{\lambda'}}{n_\lambda}$$

bei verschiedenen Zuständen der Luft denselben Wert, und es ist

$$\frac{d(\lambda/\lambda')}{\lambda/\lambda'} = \frac{dn_{\lambda'}}{n_{\lambda'}} - \frac{dn_\lambda}{n_\lambda}$$

Für verschiedene Dichten ϱ der Luft ändert sich nun der Brechungsindex bei festgehaltener Wellenlänge nach der Formel

$$n_\lambda - 1 = c_\lambda \varrho,$$

wo c_λ zwar von λ , aber nicht von ϱ abhängt. Damit wird

$$\frac{dn_\lambda}{n_\lambda - 1} = D \frac{d\varrho}{\varrho}$$

und folglich

$$\frac{d(\lambda/\lambda')}{\lambda/\lambda'} = \left(\frac{1}{n_\lambda} - \frac{1}{n_{\lambda'}} \right) \frac{d\varrho}{\varrho},$$

d. h. die relative Änderung des Verhältnisses zweier Wellenlängen bei verschiedenen Luftdichten ist gleich der relativen Änderung der Luftdichte, multipliziert mit der Differenz der reziproken Brechungs-exponenten. Für zwei Wellenlängen, von denen die eine im roten, die andere im ultravioletten Teil des Spektrums liegt, etwa bei 7000 \AA und 2000 \AA , hat die Differenz der reziproken Brechungs-exponenten etwa den Wert $5 \cdot 10^{-5}$, so daß eine Dichtigkeitsänderung von 1% das Verhältnis der Wellenlängen schon um $5 \cdot 10^{-7}$ seines Betrages ändern würde. Bei Messungen, die eine Genauigkeit von einem Tausendstel einer Ångströmschen

Einheit anstreben, muß daher eine entsprechende Korrektur angebracht werden, um sie auf einen normalen Zustand zu reduzieren

Bei der praktischen Durchführung der interferometrischen Wellenlängenmessung verfährt man gewöhnlich so, daß man eine Wellenlänge als Normale zugrunde legt. Für die Messung von Normalen zweiter Ordnung gilt als Standardwellenlänge die der roten Kadmiumlinie 6438,4696 Å, ein Wert, der für 15° C und 760 mm Hg und trockene Luft gilt. Auch wenn die Bedingungen andere sind (z. B. 10° C, 735 mm Hg), legt man doch den vorgenannten Wert zunächst zugrunde und bringt erst an den endgültigen Wellenlängenwerten die nötige Korrektur an.

Für die Ableitung der Korrektur legen wir die folgenden Bezeichnungen zugrunde

Standardlinie Wellenlänge λ' , Brechungsindex n' ,

Unbekannte Linie Wellenlänge λ , Brechungsindex n ,

bei den Versuchsbedingungen

Temp $t^\circ \text{C}$, Druck h mm Hg

Ebenso gelte $\lambda'_0, n'_0, \lambda_0, n_0$ für die Wellenlängen und Brechungsindizes bei Normalbedingungen (760 mm und 15° C). Dann gilt, wenn m die Ordnungszahl bedeutet

$$\lambda = \frac{m'}{m} \lambda'$$

In Wirklichkeit rechnen wir aber mit λ'_0 statt λ' und setzen

$$\lambda = \frac{m'}{m} \lambda'_0$$

Der Unterschied, also die später anzubringende Korrektur, ist somit

$$\delta = \lambda_0 - \frac{m'}{m} \lambda'_0 = \lambda_0 \left(1 - \frac{m' \lambda'_0}{m \lambda_0} \right) = \lambda_0 \left(1 - \frac{\lambda \lambda'_0}{\lambda' \lambda_0} \right)$$

Da nun $\lambda/\lambda_0 = n_0/n$ und $\lambda'/\lambda'_0 = n'_0/n'$, so folgt

$$\delta = \lambda_0 \left(1 - \frac{n_0 n'}{n'_0 n} \right) = \lambda_0 \left(\frac{n'_0 n - n_0 n'}{n'_0 n} \right) = \lambda_0 (n'_0 n - n_0 n')$$

da $n'_0 n$ nahe gleich eins ist

Wird die Luftdichte durch ϱ bezeichnet (Index 0 bedeutet wieder Normalbedingungen), so gilt

$$\frac{n-1}{\varrho} = \frac{n_0-1}{\varrho_0}, \quad \frac{n'-1}{\varrho} = \frac{n'_0-1}{\varrho_0}$$

Setzt man die hieraus sich ergebenden Werte von n und n' oben ein, so ergibt sich

$$\delta = \lambda_0 (n_0 - n'_0) \frac{\varrho - \varrho_0}{\varrho_0}$$

Der Faktor $\frac{\varrho - \varrho_0}{\varrho_0}$ läßt sich in Funktion von Druck und Temperatur leicht tabellarisch darstellen, und ebenso läßt sich, sofern die Normallinie festliegt, der Wert δ ebenfalls tabellarisch anordnen. Bequeme Tabellen geben MEGGERS und PEIERS, Bull. Bur. of Stand. 14, S. 728 (1919) für Cd 6438,4696 Å als Normale erster Ordnung. Diese Korrekturen sind im allgemeinen klein, aber durchaus nicht zu vernachlässigen, besonders im Ultraviolett steigen die Werte stark an. Wird z. B. eine Linie bei 2500 Å an Cd 6438 Å bei einer Temperatur von 25° C und einem Druck von 700 mm Hg angeschlossen, so ergibt sich eine Korrektur von -0,007 Å, bei einer Temperatur von 9° C wäre sie nur -0,004 Å.

Auch bei Relativmessungen mit dem Gitter hat man der Dispersion der Luft Rechnung zu tragen, falls man nach der Koinzidenzmethode Linien verschiedener Ordnungen miteinander vergleicht. Fällt bei den Versuchsbedingungen $t^{\circ}\text{C}$ p mm Druck eine Linie λ erster Ordnung mit einer Linie λ' m ter Ordnung zusammen, so gilt

$$\lambda = m\lambda'$$

Ist λ' eine bekannte Normale, die in den Wellenlängentafeln als λ'_0 , bezogen auf 760 mm und 15°C , angegeben ist, so rechnen wir aber nach der Beziehung

$$\lambda^{\lambda} = m\lambda'_0,$$

erhalten also nicht das gesuchte λ_0 , sondern es weicht λ^* von λ_0 ab um

$$\delta = \lambda_0 \left(1 - m \frac{\lambda'_0}{\lambda_0}\right) = \lambda_0 \left(1 - \frac{\lambda'_0}{\lambda_0}\right)$$

Natürgemäß ist dies die gleiche Formel, die wir für die interferometrischen Messungen angesetzt hatten. Wu kommen also auch hier zu der Endformel

$$\delta = \lambda_0 (n_0 - n'_0) \frac{e - e_0}{e_0}$$

53 Interferenzen im kontinuierlichen Spektrum FRAUNHOFERSCHE LINIEN

Wie schon oben (Ziff 49) ausgeführt wurde, kann man den Apparat von PEROT und FABRY und natürlich ebenso jedes Interferenzspektroskop auch für die Untersuchung von Absorptionslinien ohne weiteres verwenden, solange der verwendete kontinuierliche Untergrund eine kleinere Ausdehnung als das Dispersionsgebiet $12 \lambda/m$ besitzt. Wie zuerst FABRY und BUISSON gezeigt haben, lassen sich aber die Interferenzmethoden auch dann anwenden, wenn es sich um ein ausgedehntes Kontinuum mit Absorptionslinien, wie wir es etwa im Sonnenspektrum vor uns haben, handelt¹.

Laßt man durch eine planparallele versilberte Luitplatte, die in der früher beschriebenen Weise vor dem Spalt eines stigmatischen Spektralapparates montiert ist, Licht von einer kontinuierlichen Lichtquelle fallen, so erhält man im Spektrum ein System gekrümmter heller und dunkler Interferenzstreifen von parabolischer Form, deren konkave Seite gegen kürzere Wellenlängen gerichtet ist (kanalisiertes Spektrum) (Abb 23).

Diese Erscheinung erklärt sich folgendermaßen. Nach der Grundformel der PEROT FABRY Platte $m = \frac{2e}{\lambda} \left(1 - \frac{R^2}{2}\right)$ erhält man an all den Stellen im kontinuierlichen Spektrum Helligkeit, für die m ganzzahlig ist, an allen anderen Stellen wird die Intensität rasch abfallen und für Stellen mit halbzahligem m verschwinden. Ein heller Interferenzstreifen im Spektrum entspricht einem bestimmten festgehaltenen m , die beiden benachbarten den Werten $m \pm 1$. Für ein festgehaltenes m gibt die obige Formel die Kurvenform im Normalspektrum wieder, und wie man sieht, sind die Kurven nach dieser Näherungsformel Parabeln, die an den Stellen $\lambda = 2e/m$ senkrecht zur Dispersionsrichtung, also tangierend zur Spalt- richtung, verlaufen². Zwei konsekutive Parabeln haben an der der Spaltmitte entsprechenden Stelle den Wellenlangenabstand $\Delta\lambda = 2e/m^2 = \lambda/m$, also gleich der Größe des Dispersionsgebietes.

Ist nun das Kontinuum von Absorptionslinien durchzogen, so werden diese das System der Interferenzparabeln schneiden und dadurch die hellen Kurven-

¹ Über Interferenzen mit planparallelen Platten im kontinuierlichen Spektrum handelt auch eine ältere Arbeit von F. GRUECKEL und O. REICHENHEIM. Verh. D. Phys. Ges. 4, S. 209 (1906). Hier handelt es sich aber nicht um Untersuchungen von Absorptionslinien.

² Bei Berücksichtigung größerer Neigung der aus der Luitplatte austretenden Strahlen, also bei Verwendung eines sehr hohen Spaltes, sind die Interferenzstreifen durch Kurven vierter Ordnung wiederzugeben.

zuge unterbrechen, gerade an den Stellen, an denen eine Emissionslinie gleicher Wellenlänge Maxima der Intensität besaß

Die Abb 23 a gibt ein „kanneliertes Spektrum“ eines kontinuierlich leuchtenden Körpers (Krater der Bogenlampe) wieder, der Spalt ist sehr eng, das Reflexionsvermögen der Luftplatte ziemlich groß, so daß man sehr schmale Intensitätsmaxima erhält. Die Etalondistanz ist klein gehalten, ca 0,5 mm, um das Wesentliche der Erscheinung deutlich in Erscheinung treten lassen zu können. Außerdem sieht man durch Zwischenschaltung einer mit NaCl gefärbten Bunsenflamme in den Strahlengang vor dem Etalon die beiden Natriumlinien in Ab-

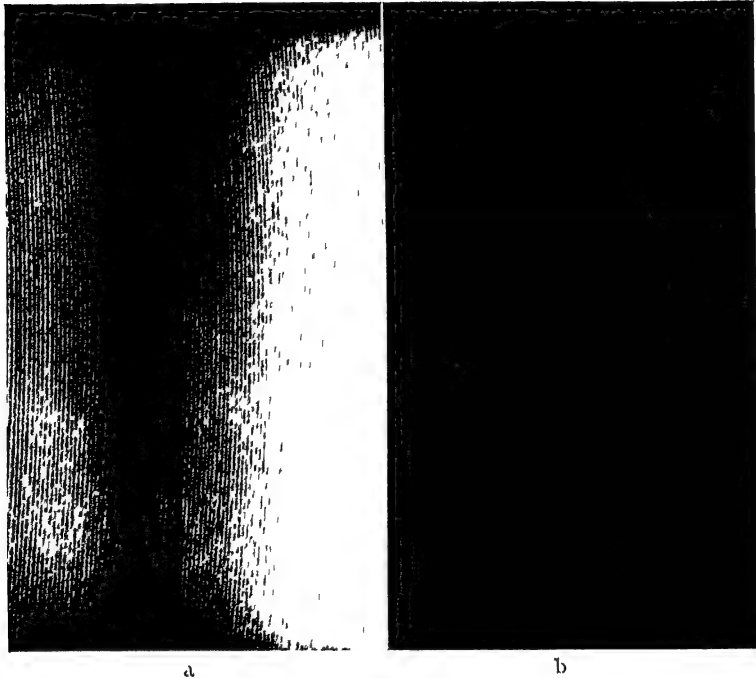


Abb 23 Interferenzen einer Planparallelplatte im kontinuierlichen Licht

sorption. Die dunklen Absorptionsstellen treten zwar in Erscheinung, sind aber für Meßzwecke ungeeignet, es wäre günstiger, wenn sie in der Dispersionsrichtung des Spektrographen eine größere Breite hätten.

Dies läßt sich nun durch Verbreiterung des Spaltes leicht erreichen. Macht man nämlich den Spalt weiter, so verbreitern sich die hellen Interferenzkurven des kannelierten Spektrums um einen der Spaltweite entsprechenden Betrag. In diesen Interferenzkurven gehört einem bestimmten Vertikalabstand vom Scheitel der Kurve eine bestimmte Wellenlänge zu, da jedem Punkt des Spaltes durch die Luftplatte eine bestimmte Wellenlänge zugeordnet wird. Dementsprechend werden bei der Erweiterung des Spaltes die bei Vorhandensein einer Absorptionslinie auftretenden schmalen Interferenzgebiete in der Dispersionsrichtung auseinandergezogen und dadurch deutlicher sichtbar (Abb 23 b). Ein Optimum wird erhalten, wenn man die Breite des Spaltes so wählt, daß aufeinanderfolgende Interferenzkurven sich gerade berühren. Ist dies der Fall, so verschwindet die Kannelierung vollkommen, dem Auge erscheint das Spektrum als kontinuierliches Spektrum, das sich aber natürlich von einem bei weitem Spalt und ohne

Interferenzapparat erhaltenen kontinuierlichen Spektrum wesentlich unterscheidet. Sehen wir von der etwa bei Prismenapparaten auftretenden Krümmung der Spektrallinien ab, so wird in dem zuletzt angeführten Fall jede monochromatische Strahlung gleichmäßig ein dem rechteckigen Spalt entsprechendes Rechteck erfüllen, und die benachbarten Wellenlangen werden zu einer Vermischung der Strahlung Anlaß geben. Ganz anders liegen die Verhältnisse bei dem durch Verbreiterung des Spaltes aus dem kannelierten Spektrum hervorgegangenen „Kontinuum“.

Hier nimmt eine Strahlung bestimmter Wellenlänge nur ein kleines, in horizontaler Richtung sich erstreckendes Gebiet ein, dessen Länge durch die Breite des Spaltes, dessen Höhe durch den Wellenlangenbereich $\Delta\lambda$ der Strahlung gegeben ist. Die benachbarten Strahlungen lagern sich mit einer kleinen, der Spektroskopdispersion entsprechenden Horizontalverschiebung übereinander und nur, weil das Auge nicht befähigt ist, kleine Wellenlangenunterschiede durch Farbenverschiedenheit zu erkennen, nimmt es dieses Spektrum als normal strukturiertes Kontinuum hin.

Da der Scheitelabstand konsekutiver Interferenzstreifen gleich $\lambda^2/2e$ ist, so sieht man, daß bei Gitter- wie Prismenspektroskopen die Einstellung auf Verschwinden des Streifen nur für einen kleinen Teil des Spektrums möglich ist. Dies macht bei der Anwendung des Verfahrens auf die Messung ausgedehnter Absorptionsspektren eine große Anzahl von Aufnahmen mit verschiedenen Spaltbreiten notwendig.

Bei diesen Betrachtungen ist vorausgesetzt, daß man es mit unendlich schmalen Interferenzstreifen und Absorptionslinien zu tun hat. Die Durchführung der Betrachtungen für den Fall einer beschränkten Zahl interferierender Strahlenbuschel und endlicher Linienbreite bietet keine Schwierigkeit. In qualitativer Weise sind diese Verhältnisse bereits von FABRY und BUISSON diskutiert [J de Physique (4) 9, S 197 (1910)]¹. Eine quantitative Durchrechnung, die für die Verwendung der Methode zur Analyse der Linienform von Absorptionslinien von Wichtigkeit wäre, ist noch nicht durchgeführt.

c) Wellenlangensysteme².

54 Zur Geschichte der Wellenlangenbestimmungen Für die Bestimmung der Wellenlänge des Lichts haben seit den ersten Versuchen von THOMAS YOUNG³ Beugungserscheinungen und Interferenzeerscheinungen im engeren Sinne gedient, und je nach dem Stande der Wissenschaft hat eine Methode die andere abgelöst. Einen hervorragenden Platz aber nimmt in der ersten Zeit der Wellenlangensmessungen die Leistung von J. FRAUNHOFER ein, der sich in zwei grundlegenden Arbeiten⁴ mit der Beugung des Lichts an Gittern beschäftigte und dabei zum erstenmal Wellenlangen exakt definierter Lichtarten, nämlich der FRAUNHOFERschen Linien im Sonnenspektrum messen konnte. Diese Arbeiten FRAUNHOFERS waren der wissenschaftlichen Spektroskopie der Folgezeit insofern wegbestimmend, als das Beugungsgitter bis zu den Arbeiten ROWLANDS vorherrschend blieb. Die Genauigkeit in der Wellenlangensmessung ging mit der Arbeit FRAUNHOFERS sprunghaft in die Höhe. Mit den von ihm hergestellten Glasgittern gelang es ihm, die Wellenlangen der FRAUNHOFERschen Linien C, D, F, G, H mit einer

¹ Siehe auch CH. E. SI. JOHN, Ap J 67, S 195 (1928), K. BURNS u. WM. I. MFGGERS, Publ. Allegh. Obs. 6, Nr. 7, S. 105 (1927).

² Verfasser K. W. MEISSNER.

³ Lectures on Natural Philosophy. London 1807.

⁴ Denkschr. d. K. Ak. d. Wiss. München 8, S. 1 (1821/22), Gilberts Ann. d. Phys. 74, S. 337 (1823).

Genauigkeit von weniger als 10^{-6} herzuleiten (D -Linie $2,175 \cdot 10^{-5}$ Pariser Zoll $= 0,588 \mu$) Diese Arbeit von FRAUNHOFER war aber auch noch in einer anderen Richtung wegbestimmend das Sonnenspektrum war durch die große Zahl „fixer Linien“ und durch die Bequemlichkeit seiner Erzeugung als Normalspektrum besonders geeignet, die Messung der Wellenlängen der stärksten FRAUNHOFERSchen Linien erschien für die nächste Zukunft als wichtigste Aufgabe, besonders nachdem KIRCHHOFF und BUNSEN die Spektralanalyse als jungen Zweig der exakten Naturwissenschaften begründet hatten¹ Bei der Durchmusterung der Spektren durch die genannten Forscher (1860/61) lag noch viel Willkür in der Festlegung der einzelnen Linien Die Beziehung ihrer Lage auf eine willkürliche Skala, eine gewisse Abhängigkeit von einem bestimmten Apparatypus (Glasspektrograph, Dispersion des Prismas), ließ im Grunde die Benennung der jungen Wissenschaft Spektroskopie als exakte Wissenschaft noch nicht in vollem Maße zu

Sie wurde es aber, als A J ÅNGSTRÖM mit Hilfe von drei NOBERTSchen Gittern die genaue Vermessung und Zeichnung des Sonnenspektrums durchführte² (1868) Durch diese nicht hoch genug zu schätzende Arbeit war die Möglichkeit geschaffen, mit beliebigen Apparaten, seien es Gitter- oder Prismenapparate, die Messung und Identifizierung von Spektrallinien durch Reduktion auf das Normalsonnenspektrum auszuführen An die Stelle der nach einer vollkommen willkürlichen Skala erfolgten Relativmessung der Linien mit dem BUNSEN-KIRCHHOFFSchen Spektroskop trat jetzt die Relativmessung in bezug auf eine physikalische, durch die Wellenlänge des betreffenden Lichts gegebene Skala In diesem Sinne bilden die Arbeiten von ÅNGSTRÖM einen Markstein in der Entwicklung der Spektroskopie Die Einheit, in der die Messungen von ÅNGSTRÖM durchgeführt wurden, war 10^{-8} cm $= 10^{-10}$ m („tenth metre“ nach STONEY), eine Einheit, die als ÅNGSTRÖMSche Einheit (Å E oder einfach Å) noch heute als Grundlage unserer Messungen im gewöhnlichen Spektralgebiet dient, während im Röntgengebiet nach dem Vorgang von SIEGBAHN die X-Einheit $= 10^{-8}$ Å benutzt wird

Die Absicht ÅNGSTRÖMS, durch seine Messungen ein Standardwerk der Wissenschaft zu schenken, wurde durch einen bedauerlichen Irrtum vereitelt ÅNGSTRÖM hatte seine Messungen mit drei NOBERTSchen Gittern ausgeführt, deren Gitterkonstante er an das Normalmeter in Upsala anschloß Unglücklicherweise wurde dessen Länge durch Anschluß an das Normalmeter in Paris von TRESCA unrichtig zu 999,81 mm bestimmt anstatt zu 999,94 mm, was später von LINDHAGEN gefunden wurde Dieser Fehler war ÅNGSTRÖM nach Abschluß seiner umfangreichen Messungen bekannt, und er selbst hat noch seinen Schuler THALÉN dazu angeregt, die große Umrechnungsarbeit vorzunehmen THALÉN selbst hat diese Arbeit durchgeführt³ und außerdem das Werk von ÅNGSTRÖM noch weiter ausgedehnt, indem er durch Relativmessungen die Funkenspektren aller damals bekannten Elemente an die ÅNGSTRÖMSche Skala anschloß Er verwendete für diese Arbeit einen Prismenspektrographen großer Dispersion

Die Fortführung und Erweiterung der ÅNGSTRÖM-THALÉNSchen Arbeiten ist besonders CORNU⁴ zu danken, der mit photographischen Methoden in das ultraviolette Gebiet vordrang

¹ Pogg Ann 110, S 161 (1860), 113, S 337 (1861)

² Recherches sur le spectre solaire Upsala 1868 u Berlin 1869, Pogg Ann 123, S 489 (1864)

³ Nov Acta Reg Soc Sc Upsal (3) 6 (1868), 9, S 1 (1875), 12, S 1 (1884)

⁴ Ann Ecole Norm sup (2) 3, S 421 (1874), 9, S 21 (1880)

Durch den unglücklichen Anschluß der ÅNGSTROMSchen Messungen an das Normalmeter und die dadurch später notwendigen Korrekturen war das Vertrauen der Spektroskopiker zu den ÅNGSTROM-THALENSchen Tafeln erschüttert. Neumessungen von Wellenlängen schienen erforderlich und wurden auch in der Folgezeit von MÜLLER und KEMPF¹, KURLBAUM², PEIRCE³ und besonders von BELL⁴ ausgeführt. Diesem standen mehrere hervorragende, von ROWLAND geteilte Plangitter zur Verfügung. Bei allen diesen Messungen diente als Lichtquelle eine Natriumflamme, deren beide Linien D_1 und D_2 ausgemessen wurden. Durch genauen Anschluß der Gitterkonstante an das Normalmeter erhielten diese Beobachter für D_1 Werte, die in guter Übereinstimmung waren (vgl. Tab. 1).

Den größten Aufschwung nahm die Spektroskopie durch die Arbeiten von ROWLAND⁵, dem durch die Konstruktion einer ganz vorzüglichen Teilmaschine die Teilung von Gittern gelang, die alle bisher geschaffenen an Güte weit übertrafen. Durch die Erfindung des Konkavgitters (Kap. 3, Ziff. 34) beschenkte er die Wissenschaft mit einem Universalinstrument, das für jeden Spektralbereich geeignet war und ohne Zuhilfenahme von Linsen oder abbildenden Systemen ein Spektrum entwarf. Mit den Arbeiten von ROWLAND können wir den Beginn einer neuen Epoche der exakten Spektroskopie datieren.

55 Das ROWLANDSche Wellenlangensystem Durch die Erfindung und weitgehend befriedigende Herstellung des Konkavgitters (1882) hatte ROWLAND ein Hilfsmittel gefunden, das wie kein zweites dazu geeignet war, Relativmessungen nach der Koizidenzmethode (Ziff. 33) auszuführen. Mit Hilfe eines großen Konkavgitters von über 6 m Krümmungsradius wurden die Spektren der Sonne und der verschiedenen Elemente untersucht. Die bei den Relativmessungen erzielte Genauigkeit war von ROWLAND selbst auf wenige Tausendstel Å geschätzt worden, und das Wellenlangensystem ROWLANDS galt fast allgemein als so zuverlässig, daß es bis 1906 allen Wellenlängenmessungen physikalischer oder astrophysikalischer Art zugrunde gelegt wurde.

Für die Methode der Koizidenzmessung mit dem Gitter ist im Grunde die Kenntnis der Wellenlänge nur einer Spektrallinie erforderlich. Als Grundlage für seine Messungen verwendete ROWLAND als primäre Normale (Primary Standard) die Wellenlänge der D_1 -Linie des Natriums, die von den in Tabelle 1 angegebenen Beobachtern bestimmt worden war. Durch Beilegung verschiedenen Gewichts erhielt ROWLAND aus diesen Messungen als Mittelwert den seinem Wellenlangensystem zugrunde liegenden Wert für

$$D_1 \quad \lambda_{\text{Rowl}} \quad 5896,156 \text{ Å}$$

Der Wert dieser Wellenlänge gilt für Luft normaler Zusammensetzung von 20° C und 760 mm Druck. ROWLAND legte seine umfangreichen Beobachtungen nieder in dem Standardwerk „A Preliminary Table of Solar Spectrum Wave Lengths“,

¹ Potsdam Publ. 5 (1886) ² Wied. Ann. 33, S. 159 u. 381 (1888)

³ Amer. J. of Sc. (3) 18, S. 51 (1879), Nature 24, S. 262 (1881)

⁴ Amer. J. of Sc. (3) 33, S. 167 (1887), 35, S. 265 u. 347 (1888), Phil. Mag. (5) 23, S. 265 (1887), 25, S. 255 u. 350 (1888)

⁵ Amer. J. of Sc. (3) 33, S. 182 (1887), Phil. Mag. (5) 23, S. 257 (1887), 27, S. 479 (1889), 31, S. 49 (1891), Astr. and Astroph. 12, S. 321 (1893), Ap. J. 1 bis 5 (1895/98)

deren Veröffentlichung in den Jahren 1895 bis 1897 erfolgte¹. Ein ausgezeichnete Atlas vervollständigt diese Tabellen. Der Atlas gibt auf einzelnen Tafeln das ganze Sonnenspektrum wieder. Jedes Spektralgebiet ist mit einer Skala versehen, auf der die Wellenlänge jeder einzelnen Linie mit einer Genauigkeit von 0,01 Å abzulesen ist. Außer dieser Arbeit wurden von ROWLAND die Spektren einer großen Anzahl von Elementen ausgemessen und auf ihre Anwesenheit im Sonnenspektrum untersucht. Die ROWLANDSchen Messungen dienten für eine ganze Generation von Spektroskopikern als Standardwerk. Von den zahlreichen Forschern, die sich mit der Weiterführung des Werkes von ROWLAND befaßten, seien genannt HARTLEY, LIVEING und DEWAR, EDER und VALENIA, KAYSER und RUNGE, EXNER und HASCHECK.

Daß das ROWLANDSche, in der Preliminary Table endgültig festgelegte Wellensystem nicht frei ist von systematischen Fehlern, wurde in der Folgezeit von verschiedenen Beobachtern festgestellt. Es trat dies besonders bei der Vergleichung weit voneinander liegender Spektralgebiete in Erscheinung und es zeigte sich, daß in dem ROWLANDSchen System langsam verlaufende Unregelmäßigkeiten vorhanden sind. Die Abweichungen, die über längere Strecken mancher Spektralgebiete konstant blieben, betrugen bis zu 0,02 Å. Derartige Beobachtungen wurden zuerst von MÜLLER² und später von KAYSER³, FABRY und PEROT⁴ sowie EBERHARD⁵ gemacht.

HARTMANN⁶ unterzog das ROWLANDSche Wellenlangensystem einer eingehenden Kritik und machte uns einzelne gehende Vorschläge zur Gewinnung eines in sich richtigen korrigierten ROWLANDSchen Systems. In diesen Arbeiten findet man neben wertvollen Angaben über die Entstehungsweise der ROWLANDSchen Wellenlangenwerte auch sehr beachtenswerte Ausführungen über grundsätzliche Forderungen, die an ein brauchbares Wellenlangensystem zu stellen sind. Durch HARTMANN'S Arbeiten wurde die Unzulänglichkeit des ROWLANDSchen Systems besonders deutlich vor Augen geführt und die Aufstellung eines Planes zur Schaffung eines neuen Systems beschleunigt (s. Ziff 58).

56 MICHELSON'S Messungen mit dem Interferometer. Wenngleich die Messungen ROWLANDS alle Messungen seiner Vorgänger an Genauigkeit weit übertrafen, so genugten sie doch sehr bald nicht mehr den Anforderungen, als MICHELSON durch die Konstruktion seines Interferometers⁷ eine neue Möglichkeit genauer absoluter Wellenlangenmessungen geschaffen hatte. Mit dem neuen Instrument war es möglich, mit praktisch beliebig großem Gangunterschied zu arbeiten, insofern nur die Homogenität des verwendeten Lichts dies zuließ. Zum erstenmal in der Geschichte der Wellenlangenmessungen sehen wir in den Arbeiten von MICHELSON die Frage nach der Beschaffenheit der Spektrallinien, ihrer Bemstruktur, Intensitätsverteilung auftreten und in einer für die nachherige Auswahl der Normalwellenlangen so wichtigen Vorarbeit hat MICHELSON eine große Reihe von Spektrallinien aus der sog. Sichtbarkeitskurve auf ihre Zusammensetzung analysiert. Bei der Prüfung von nahezu 100 verschiedenen Spektrallinien ergaben sich als besonders homogen oder aus homogenen Komponenten zusammengesetzt drei Linien des Kadmiumdampfes, von denen die rote als die

¹ Chicago Univ Press 1898, 392 S, 8°

³ Ann Chim Phys 7, S 25 u 98 (1902)

⁵ Ap J 17, S 141 (1903)

⁶ Z f wiss Photogr 1, S 215 (1903), 2, S 164 (1904), Ap J 20, S 41 (1904), vgl auch Astr Mitt Sternw Gott 19 (1916)

⁷ A. A. MICHELSON u E. W. MORLEY, Amer J of Sc 34, S 427 (1887), 38, S 181 (1889), Phil Mag (5) 24, S 463 (1887), A. A. MICHELSON, ebenda (5) 13, S 236 (1882), 31, S 256 u 338 (1891), 34, S 280 (1892), J de Phys (3) 3, S 5 (1894), Benoît, Irav et Mém Bur Inst des Poids et Mes 11 (1895)

² Potsdam Publ 8, S 49 (1891)

⁴ Ann d Phys 4, 3, S 195 (1900)

geeignetste eischen Die für die Erzeugung des Kadmiumdampfes dienende Lichtquelle war eine hochevakuerte, mit Kadmium beschickte, auf ca 300° erhitzte GEISSLER-Rohre, die mit hochgespanntem Strom betrieben wurde¹ Die Werte, die MICHELSON für die drei Linien fand, sind folgende rot $6438,4722 \cdot 10^{-8}$ cm, grün $5085,8240 \cdot 10^{-8}$ cm, blau $4799,9107 \cdot 10^{-8}$ cm Diese Werte gelten für normale Luft von 15° C und 760 mm Hg Der Gehalt an Feuchtigkeit der Luft ist dabei unberücksichtigt geblieben

Die Werte von ROWLAND für dieselben Linien sind wesentlich andere Für 20° C und 760 mm Druck ist nämlich Cd rot $6438,680$ Å, Cd grün $5086,001$ Å und Cd blau $4800,097$ Å Wie man sieht, sind die Abweichungen zwischen den Werten von MICHELSON und ROWLAND recht beträchtlich, wenn man die große relative Genauigkeit der ROWLANDSchen Messungen bedenkt Die Unterschiede sind in erster Linie auf den zu großen Wert der ROWLANDSchen Primar-Normallinie zurückzuführen (nach neueren Bestimmungen wäre die Wellenlänge D_1 (Rowl) $5896,156$ Å zu verkleinern um $0,212$ Å) Wäre dies aber der einzige Fehler, so könnte die ganze Wellenlängentabelle ROWLANDS sehr leicht umgerechnet werden, da die anzubringenden Korrekturen einfach den Wellenlängen proportional waren Daß die Verhältnisse aber nicht so einfach liegen, zeigen die Vergleichszahlen in der Zusammenstellung der Kadmiumlinien Wurde man die grüne und blaue Kadmiumlinie in der angegebenen Weise ändern, so ergaben sich Korrekturen von $-0,164$ bis $-0,155$ Å für die grüne bzw blaue Linie und korrigierte Wellenlängen von $5085,837$ bzw $4799,942$ Å Nach dem MICHELSONSchen Ergebnis waren also auch die relativen Wellenlängen von ROWLAND um $0,013$ bzw $0,037$ Å fehlerhaft Diese Fehler sind zwar wesentlich kleiner als die aller spektroskopischen Messungen vor ROWLAND, sie übertreffen aber ROWLANDS eigene Schätzung bei weitem Wie man heute weiß, verteilen sich die Korrekturen auch ziemlich unregelmäßig auf das ganze Spektrum (s Ziff 66), und es dürfte schwer sein, die einzelnen Gründe für diese Verteilung zu analysieren Die Methode der Koinzidenzen ist an und für sich sicher unverfänglich, obgleich sie in der von ROWLAND angewendeten Form des schrittweisen Anschlusses neuer Linien und durch das angewendete Ausgleichsverfahren großen Fehlerquellen Zulaß gestattet Die Hauptfehlerquelle liegt wohl in dem Bestreben, die Wellenlängen des Sonnenspektrums mit denen der Bogenspektren in Einklang zu bringen Dadurch entstanden nicht mehr zu übersehende und ungleichmäßig verteilte Fehler²

Dies ergibt sich ganz besonders aus den Untersuchungen von JEWELL³, der bei der Ausmessung von ROWLANDSchen Platten Unterschiede in der Wellenlänge von Sonnenlinien und den entsprechenden Linien der Laboratoriumslichtquellen fand Die Wellenlängen im Lichtbogen von Eisen, Natrium, Kobalt, Mangan, Strontium, Barium und Kalzium waren meist nach der kurzwelligen Seite gegen die Sonnenlinien verschoben und in verschiedenen Beträgen selbst bei Linien des gleichen Elements Diese Verschiebungen betragen in einigen Fällen mehr als $0,02$ Å

57 Druckverschiebung der Spektrallinien Einen Grund für die Verschiebung der Spektrallinien fanden HUMPHREYS und MOHLER⁴ Nach ihren Beobachtungen verschieben sich die Spektrallinien eines unter höheren Druck gesetzten Lichtbogens ungefähr proportional dem Druck, und zwar nach der kurzwelligen

¹ Eine Lampe ähnlicher Art beschreibt neuerdings G S MONK, Ap J 62, S 375 (1925)

² Siehe besonders die Ziff 55 angeführten Abhandlungen von J HARTMANN

³ Ap J 3, S 89 (1896), J de Phys (3) 6, S 84 (1897)

⁴ Ap J 3, S 114 (1896), 4, S 17 u 249 (1896), 6, S 169 (1897), J de Phys (3) 6, S 82 (1897), J S AMES u W J HUMPHREYS, Phil Mag (5) 44, S 119 (1897)

Seite des Spektrums Aus dieser Beobachtung schließen sie, daß die von JEWELL beobachteten Differenzen auf die höheren Drucke zurückzuführen sind, die in der umkehrenden Schicht der Sonne herrschen Wie immer aber auch die Deutung der JEWELLSchen Beobachtungen ausfallen mochte, so viel war klar, daß die führende Rolle, die das Sonnenspektrum bisher als Normalspektrum spielte, ihm genommen werden und daß nach einem anderen Standardspektrum Umschau gehalten werden mußte Die hohe Meßgenauigkeit, die die interferometrischen Methoden und die größten ROWLANDSchen Konkavgitter in die spektroskopischen Messungen gebracht hatten, machten den Plan eines neuen Systems von Normallinien dringend notwendig

58 Plan eines neuen Wellenlangensystems Um der Unsicherheit im ROWLANDSchen Wellenlangensystem ein Ende zu machen, wurde auf Anregung von G E HALE im Jahre 1904 eine internationale Vereinigung „International Union for Cooperation in Solar Research“ gegründet, die den Zweck haben sollte, ein neues System von Normalen aufzustellen Die erste Zusammenkunft fand im Jahre 1904 in St Louis statt, die zweite 1905 in Oxford Hier wurde beschlossen, das von MICHELSON begründete Wellenlangensystem international anzunehmen Als dann nach dem von FABRY und PEROT¹ ersonnenen, abgeänderten interferometrischen Verfahren eine Neubestimmung der roten Kadmiumlinie durchgeführt worden war, wurde bei der 3 internationalen Versammlung im Jahre 1907 zu Meudon die Definition der ÅNGSTRÖMSchen Einheit dadurch beschlossen, daß für die Wellenlänge der im GRISSEYER-Rohr nach MICHELSON erzeugten roten Kadmiumlinie in trockener Luft von 15°C und 760 mm Hg der Wert

$$\lambda_{\text{rot}} = 6438,4696 \text{ Å}$$

angesetzt wurde Die rote Kadmiumlinie sollte künftig für alle Wellenlangemessungen als „Normallinie erster Ordnung“ dienen Die Genauigkeit, die bei diesen Messungen erreicht wurde, ist so groß, daß man annehmen kann, der Wert der Wellenlängen sei bis auf ein Zehnmilliontel, d h weniger als 0,001 Å, genau Faßt man umgekehrt die Definition der ÅNGSTRÖM-Einheit als durch die Wellenlänge der roten Kadmiumlinie gegeben auf, so ist anzunehmen, daß die ÅNGSTRÖM-Einheit mit einer Genauigkeit von etwa ein Funfmilliontel mit dem Hundertmilliontel eines Zentimeters übereinstimmt, wobei das Zentimeter definiert ist als der 100 Teil des von der Internationalen Meterkonvention bestimmten, im Bureau International des Poids et Mesures in Sevres bei Paris aufbewahrten Strichmaßes aus Platin-Iridium bei 0°C

Eine größere Genauigkeit als die jetzt erreichte wird kaum zu erlangen sein Die spektroskopische Genauigkeit ließe sich an und für sich weitertreiben, aber die Entfernung der Endstriche des Mètre des Archives ist nicht genauer definiert Die Endstriche haben keine absolute Feinheit und die mikroskopische Einstellung bietet keine absolute Sicherheit Die Fehlergrenze, innerhalb der eine Kopie des Meters mit dem Prototyp verglichen werden kann, ist nach BENOÎT etwa 0,2 µ, d h eben ein Funfmilliontel Es ist auch keineswegs sicher, daß die Endstriche auf dem Meter-Prototyp im Laufe der Zeiten unverändert bleiben, während man viel eher wird annehmen können, daß die Wellenlänge der roten Kadmiumlinie unter den angegebenen Bedingungen immer dieselbe ist und in jedem Laboratorium leicht reproduziert werden kann

59 Internationale ÅNGSTRÖM-Einheit Normallinien zweiter Ordnung Auf der dritten Zusammenkunft der Internationalen Union in Pasadena (Mt Wilson)

¹ C R 126, S 1624 (1898), Ann Chim Phys (7) 12, S 459 (1897), J R BENOÎT, CH FABRY u H BUISSON, C R 144, S 1082 (1907), Z f Instrk 27, S 309 (1907)

im Jahre 1910 wurde die durch die Festsetzung der Wellenlänge der roten Kadmiumlinie gegebene ÅNGSTROM-Einheit zur Unterscheidung von der ursprünglichen Einheit 10^{-10} m als Internationale ÅNGSTROM-Einheit, I Å, bezeichnet. Dadurch wird die Frage nach der Genauigkeit des Anschlusses dieser Einheit an den hundertmillionten Teil eines Zentimeters zu einer zweiten, den Spektroskopiker nicht weiter interessierenden Frage.

Ferner wurde auf dieser Versammlung beschlossen, ein System von „Wellenlängennormalen zweiter Ordnung“ durch interferometrischen Anschluß an die rote Kadmiumlinie zu schaffen. Die Arbeiten von ROWLAND waren in dieser Frage von einschneidender Bedeutung einmal insofern, als das Konkavgitter sich nicht als hinreichend zur Ermittlung von Normalen zweiter Ordnung eignete, und zweitens insofern, als sich besonders durch die Arbeiten von JEWELL schon gezeigt hatte, daß das Sonnenspektrum als Standardspektrum vollkommen ungeeignet sei. Die FRAUNHOFERSchen Linien, die seit ÅNGSTROM als besonders vorteilhaft zur Schaffung eines Normalensystems galten, gaben diese führende Stellung nun an besonders scharfe Eisenlinien ab, und bereits im Jahre 1910 konnten auf Grund von Messungen von FABRY und BUISSON¹ in Marseille, von PFUND² in Baltimore und von EVERSHEIM³ in Bonn eine Liste von 49 Eisenlinien zwischen 4200 und 6500 Å als Normalen zweiter Ordnung des internationalen Systems erklärt werden. Der Anschluß an die Normalen erster Ordnung war nach den Beschlüssen von 1907 nach der FABRY und PEROTSchen interferometrischen Methode durchgeführt worden. Im Jahre 1913 (Bonn) wurde noch eine Reihe von Eisenlinien dazugenommen, so daß nun ein genügend gesichertes System von Wellenlängen im Bereich von 3371 und 6750 I Å festzulegen schien. Die Messungen der einzelnen Beobachter stimmten bei den meisten Linien innerhalb von 0,003 Å überein, und es schien die Ansicht gerechtfertigt, daß die endgültigen Werte auf ein bis zwei Tausendstel Å richtig sein würden. Aber es sollte sich bald zeigen, daß man hinsichtlich der Wahl und Definition der Lichtquelle zu leichtfertig vorgegangen war.

60 Poleffekt Bei dem Versuch, die Wellenlängen weiterer Eisenlinien zwischen den Normalen zweiter Ordnung mit einem großen Konkavgitter zu interpolieren, fand GOOS⁴, daß die Wellenlänge einer Eisenlinie an verschiedenen Stellen des Lichtbogens zwischen Eisenelektroden merklich verschieden sein kann. GALE und ADAMS⁵ hatten in Fortsetzung der in Ziff 57 zitierten Arbeit von HUMPHREYS und MOHLER die Druckverschiebung der Eisenlinien zwischen 3600 und 6700 Å untersucht und gefunden, daß man vier mit *a*, *b*, *c*, *d* bezeichnete Gruppen von Linien hinsichtlich der Druckverschiebung unterscheiden kann. In der gleichen Spektralgegend verhalten sich die Druckverschiebungen dieser vier Gruppen wie 1 1,5 3,4 6,6, und innerhalb jeder Gruppe wachsen sie ungefähr proportional der dritten Potenz der Wellenlänge mit dieser an, nehmen also im rotwelligen Gebiet große Werte an. GALE war nun der Ansicht, daß die von ihm an den verschiedenen Teilen des Eisenbogens beobachteten Verschiebungen im wesentlichen den verschiedenen Druck an den verschiedenen Teilen des Lichtbogens zuzuschreiben seien. Spätere Untersuchungen von ST JOHN und BARCOCK⁶ zeigten jedoch, daß außer dem Druck auch der Poleffekt eine Rolle spielt. Dieser Poleffekt besteht darin, daß manche Linien in der Nahe des

¹ C. R. 143, S. 165 (1906), J. de Phys. (4) 7, S. 169 (1908)

² Ap. J. 28, S. 197 (1908) ³ Ann. d. Phys. (4) 30, S. 815 (1909)

⁴ Z. f. Wiss. Photogr. 11, S. 1 u. 305 (1912), 12, S. 259 (1913), Ap. J. 35, S. 221 (1912), 37, S. 48 (1913), 38, S. 141 (1913), A. N. 199, S. 33 (1914)

⁵ Ap. J. 35, S. 10 (1912), Phys. Rev. 34, S. 143 (1912)

⁶ Phys. Rev. (2) 9, S. 577 (1917), Ap. J. 42, S. 231 (1915), 46, S. 138 (1917)

negativen Poles eines Eisenbogens eine unsymmetrische Verbreiterung und eine Verschiebung erfahren. Wie TAKAMINE¹ später zeigen konnte, ist der Poleffekt nichts anderes als der durch das elektrische Feld im Lichtbogen hervorgerufene Starkeffekt. Übrigens hängt auch die Druckverschiebung sehr wahrscheinlich mit dem Starkeffekt zusammen, den die elektrischen Felder der benachbarten Gasmoleküle erzeugen.

Alle diese Untersuchungen zeigten, daß die Lichtquelle, die man zur Erzeugung von Normallinien zu benutzen gedenkt, hinsichtlich aller Betriebsdaten genauestens zu definieren ist. ST JOHN und BABCOCK² schlugen nun einen in atmosphärischer Luft brennenden Eisenbogen von 12 mm Länge vor, aus dessen Mitte ein Stück von nur 1,25 mm Länge ausgeblendet wird und der mit einer maximalen Stromstärke von 5 Ampere betrieben werden soll.

Die Erkenntnis dieser Veränderlichkeit der Wellenlängen hat gezeigt, daß eine Reihe von Normallinien zweiter Ordnung, die auf der Zusammenkunft in Bonn 1913 noch durch eine Liste von Wellenlängen ergänzt worden war, kein restloses Zutrauen verdient. Eines war klar, sollte ein einheitliches und einwandfreies Wellenlangensystem geschaffen werden, so war es dringend notwendig, ganz besonders auch den Lichtquellen, ihren einzelnen Daten und Betriebsbedingungen die größte Aufmerksamkeit zu widmen.

Mit diesen Fragen beschäftigte sich nun in tiefeschürfender Weise die „Commission des étalons de longueur d'onde et des tables de spectres solaires“ der International Astronomical Union (I A U), die in den Jahren 1922 (Rom), 1925 (Cambridge), 1928 (Leiden) und 1932 (Cambridge, Mass.) getagt hat. Die Beschlüsse und Beratungen dieser Kommission sind niedergelegt in den „Transactions of the International Astronomical Union“, von denen zur Zeit vier Bände, 1922/25/28/32, vorliegen.

Überblicken wir noch einmal rückschauend alles, was an intensiver Arbeit seit ÅNGSTRÖM bis zum Jahre 1920 geleistet worden ist, so können wir konstatieren, daß zur Begründung eines abgeschlossenen Wellenlangensystems einwandfreie Methoden zur Bestimmung einer primären Normale geschaffen worden sind und daß die Messung einer solchen mit großer Präzision erfolgt ist. Wir können ferner als Erfolg verbuchen, daß bequeme, einwandfreie Methoden durchgearbeitet wurden, mit denen es ohne die Fehler, die beim Konkavgitter unvermeidlich sind, möglich ist, an die „Normalen erster Ordnung“ weitere Linien als „Normalen zweiter Ordnung“ anzuschließen, in einem so engen Bereich, daß zur Bestimmung von „Normalen dritter Ordnung“ das Konkavgitter zur bequemen Interpolation in seine Rechte treten kann. Als unzureichend ist aber anzusehen, daß es trotz aller dieser Möglichkeiten und aller aufgewendeten Arbeit bis zu dem genannten Jahr 1920 nicht gelungen ist, ein restlos einwandfreies Wellenlangensystem mit Hilfe des Eisenspektrums zu schaffen. Erst durch die intensive Zusammenarbeit, die durch die obengenannte Kommission der I A U eingeleitet wurde, ist man in den nächsten Jahren zu diesem Ziel gelangt.

61 Die Arbeiten der Commission des étalons de longueur d'onde et des tables de spectres solaires. Nachdem die Spektroskopiker eine fast 50jährige Erfahrung auf dem Gebiet der Schaffung eines Normalensystems hinter sich hatten, wußte man bei der ersten Zusammenkunft der I A U im Jahre 1922 im wesentlichen Bescheid, welche Bedingungen ein Normalensystem zu erfüllen habe. Drei Fragen sind von wesentlicher Bedeutung: 1. Ist die primäre Normallinie Cd 6438 international anzuerkennen? 2. Welche Lichtquellen sind für ein Normalensystem

¹ Ap J 50, S 23 (1919)

² Ap J 42, S 231 (1915), 46, S 138 (1917)

zweiter Ordnung geeignet? 3 Wahl des Normalensystems zweiter Ordnung und Schaffung von Normalen dritter Ordnung

Die Frage nach der absoluten Wellenlänge der primären Normallinie ist im Grunde genommen für die Interessen der Spektroskopie, bei der nur Wellenlängen- und Wellenzahldifferenzen Bedeutung haben, unwesentlich. Die absolute Wellenlänge geht in der Atomphysik nur in die absolute Normierung der Terme, d. h. der Energieniveaus des Atoms, ein. Hierfür ist aber noch nicht einmal die Genauigkeit nötig, die etwa der absoluten Bestimmung ÅNGSTRÖMS zukommt. Vom Standpunkt der Atomphysik aus wäre es daher zweckentsprechend, die Wellenlänge irgendeiner Spektrallinie willkürlich als Einheit zu wählen, von dieser Linie ausgehend auf interferometrischem Wege die übrigen Linien zu bestimmen und nur dort, wo es not tut, von den willkürlichen Einheiten zu den absoluten überzugehen. Das Verhältnis der willkürlichen zur absoluten Einheit wurde dabei durch besondere Messungen zu ermitteln sein, und dieses Verhältnis konnte auch je nach dem Stande der Meßtechnik zu verschiedenen Zeiten mit immer größerer Genauigkeit ermittelt werden, ohne daß das Wellenlängen- und Wellenzahlensystem sich in irgendeiner Weise ändern mußte. Die einzige Forderung, die aufgestellt werden muß, ist die der eindeutigen, in allen Laboratorien leicht möglichen Erzeugung und Reproduktion der als primäre Normale gewählten Wellenlänge. Mit dieser Überlegung decken sich auch die Beschlüsse der I A U, und es seien kurz die Empfehlungen und Beschlüsse hinsichtlich der primären Normalen aufgeführt. Im Jahre 1922 wird die primäre Normale betreffend folgendes ausgeführt: Die bemerkenswerte Scharfe der roten Kadmiumlinie, die außerordentliche Genauigkeit, mit der das Meter in dieser Einheit ausgewertet wurde, und die endgültige Definition der internationalen ÅNGSTRÖM-Einheit durch die International Union for Cooperation in Solar Research in Paris im Jahre 1907 scheinen die primäre Standardlinie außer Frage zu stellen. Sollte das Internationale Bureau für Maß und Gewicht eine andere, vielleicht mehr geeignete Wellenlänge als Langennormale annehmen, so würde sich konsequenterweise die Notwendigkeit ergeben, das Verhältnis zwischen der ÅNGSTRÖM-Einheit und der neuen Langeneinheit zu bestimmen.

Bleib also damit der Zahlenwert der primären Standardlinie außer Frage, so ergaben doch Erfahrungen beim Anschluß sekundärer Normalen die Notwendigkeit, für die Lichtquellen, mit der die primäre Normale erzeugt wird, genaue Daten zu geben. Es erhob sich die Frage, ob man sich streng an die von MICHELSON geschaffene Form einer Kadmiumlampe zu halten habe oder ob man auch, wie es vielfach geschehen war, Quarzvakuum-Kadmiumbogenlampen verwenden dürfe.

Im Jahre 1925 wurden dann von der I A U folgende Einzelheiten für die Erzeugung der primären Wellenlängennormalen provisorisch angenommen:

„L'étalon primaire de longueur d'ondes, λ 6438,4696 du cadmium, sera produit par un courant électrique à haute tension dans un tube à vide portant des électrodes intérieures. La lampe sera maintenue à une température ne dépassant 320°C , et devra donner des différences de marche d'au moins 200000 longueurs d'ondes. La valeur efficace du courant d'excitation ne dépassera pas 0,05 ampère. À la température de la salle, le tube ne sera pas lumineux quand il sera connecté au circuit habituel à haute tension.“

Mit dieser eingehenden Präzisierung der Normallichtquelle stimmt leider die Definition der Internationalen Konferenz für Maß und Gewicht im Jahre 1927 nicht überein, bei der offenbar durch Unachtsamkeit auf den Wortlaut des ursprünglichen Vorschlags der I A U von 1925 zurückgegriffen wurde.

Die von der Internationalen Konferenz für Maß und Gewicht gegebene nähere Beschreibung lautet folgendermaßen

„La lumière doit être produite par un courant électrique à haute tension continu ou alternatif, de fréquence industrielle (à l'exclusion de la haute fréquence), dans un tube à vide ayant des électrodes intérieures. La lampe doit avoir un volume ne dépassant pas 25 cm^3 et un tube capillaire dont le diamètre ne soit pas inférieur à 2 mm , elle doit être maintenue à une température voisine de 320° , et la valeur du courant qui la traverse ne doit pas excéder $0,02 \text{ ampère}$. À la température ambiante, le tube ne doit pas être lumineux lorsque le circuit à haute tension y est établi“

Der Hauptunterschied der beiden Auffassungen besteht also darin, daß die I A U die Forderung der Möglichkeit, bei einem Mindestgangunterschied von 200 000 Wellenlängen noch klare Interferenzen zu haben, als ungenügendes Charakteristikum der Lichtquelle ansieht, während die I K f M u G dies durch die Angabe eines Mindestvolumens der Lampe zu erreichen glaubt. Besonders BABCOCK [Trans Internat Astr Union 3, S 237 (1928)] trat für die von der I A U gegebene Formulierung ein, in der Überzeugung, daß die spektroskopisch klar zum Ausdruck kommende Forderung des Mindestgangunterschieds die Vorschrift von Temperatur, Stromstärke und Volumen der Lampe unnötig mache, die Einschränkung, daß die Lampe bei Zimmertemperatur mit dem verwandten Hochspannungsaggregat nicht angeregt werden kann, hält er dagegen für nützlich, da dadurch vermieden wird, daß gasförmige Verunreinigungen (Stickstoff- oder Kohlenwasserstoffbanden) durch zu starken Untergrund die Interferenzstreifen storen, wenn etwa nur mit einem Rotfilter die rote Linie ausgeblendet wird.

Nach Lage der Dinge ist also die endgültige einheitliche Formulierung noch abzuwarten, ebenso ist noch zukünftigen Beschlüssen überlassen, ob eine „engherzige Festlegung“ der Normallichtquelle notwendig ist, oder ob nicht auch der Kadmium-Vakuumbogen zugelassen werden kann. Untersuchungen über die Zulässigkeit solcher Lichtquellen sind in neuerer Zeit verschiedentlich ausgeführt worden. So hat JACKSON¹ interferometrische Untersuchungen über den Ersatz der MICHELSON-Lampe durch den Kadmium-Vakuumbogen angestellt. Er kommt zu dem Resultat, daß bei Verwendung reinen Kadmioms die rote Linie der Bogenlampe sich identisch mit der der MICHELSONschen Lampe ergibt bis auf $1/10^7$ oder auf $0,0006 \text{ Å}$. Schon im Jahre 1926 hatte BROWN² geschlossen, daß der Unterschied in der Wellenlänge der roten Linie in den beiden Lichtquellen kleiner ist als $0,001 \text{ Å}$, was auch mit den Beobachtungen einiger früherer Forscher übereinstimmt. Diese relativ gute Übereinstimmung der Emission zweier so verschiedener Lichtquellen läßt auch die Differenz in den beiden grundlegenden Definitionen der I A U und I K f M u G nicht so tragisch erscheinen, doch ist zu hoffen, daß in Balde eine übereinstimmende Charakterisierung der primären Lichtquelle gegeben wird. Zu warnen ist nach den Untersuchungen von JACKSON und BURNS vor dem Gebrauch der Quarz-Kadmium-Quecksilberdampf Lampe. JACKSON untersuchte verschiedene Typen, von denen sich aber keine als brauchbar zur Erzeugung von Standardwellenlängen erwies. Auch BURNS hatte gefunden, daß Amalgamlampen durchweg zu hohe Werte für die Wellenlänge der roten Kadmiumlinie ergeben.

Eine neue Form der Kadmiumlampe wurde von NAGAOKA und SUGIURA³ beschrieben. Bis zu einer Interferometerplattendistanz von 20 cm blieben die

¹ Proc Roy Soc A 133, S 563 (1931)

² J Opt Soc Am 13, S 183, (1926)

³ Sc Pap Inst Ph CH Res Tokyo 1929, Nr 191

Interferenzen klar sichtbar, bei weiterer Vergrößerung der Distanz treten periodisch Schwankungen in der Deutlichkeit der Streifen auf, woraus auf eine komplizierte Struktur der Linien geschlossen wird

62 Vergleiche des Meters mit der Standardlinie wurden auch in neuerer Zeit wiederholt. So haben WATANABE und IMAIZUMI¹ eine Präzisionsmessung durchgeführt, die in außerordentlich guter Übereinstimmung mit den früheren Weiten ist. Daraus wurde folgen, daß auch nach 30 Jahren keine Änderung des Meterprototyps festzustellen war. Auch im National Physical Laboratory in Teddington (England) wurden mit einem neuen Wellenlängenkomparator Neumessungen der Meterlänge in Einheiten der roten mit der MICHELSON-Lampe erzeugten Kadmiumlinie vorgenommen, und zwar in Luft wie auch im Vakuum. Das vorläufige Ergebnis ist folgendes:

Versuchsbedingungen	Anzahl Wellenlängen auf 1 Meter	Wellenlänge
Normalluft (trockene Luft bei 15 °C und 760 mm Hg mit 0,03 % Kohlensäure)	1 553 163 69	0,6438 4714 10^{-6} m
Vakuum	1 552 734 44	0,6440 2513 10^{-6} m

Die Übereinstimmung mit dem zur Zeit gültigen internationalen Wert liegt nicht mehr innerhalb der von FABRY und BUISSON angenommenen Fehlergrenze. Eine Kontrolle der Messungen ergibt sich aus dem Brechungsindex, der aus der Luft- und Vakuummessung folgt. Es ergibt sich $n = 1,00027645$, während von anderen Beobachtern gefunden wird:

PIRARD	1,000276413
MEGGERS und PETERS	1,000275814
SIOLL	1,000275894

Ein Urteil über die erreichte Genauigkeit läßt sich aus dem Vergleich mit bisherigen Resultaten über den Brechungsindex nicht geben, der Wert von PIRARD erscheint, verglichen mit den übrigen Werten, als unbedingt zu hoch. Außer diesen Messungen sind im Zusammenhang mit der Frage nach einer geeigneten primären Normale auch Versuche der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt zu Charlottenburg zu erwähnen, die KOSTERS und seine Mitarbeiter² ausgeführt haben. Hier werden besonders die scharfen Linien von Krypton herangezogen, die bis zu besonders hohen Gangunterschieden noch Interferenzen geben.

63 Normallinien zweiter Ordnung Wie wir schon oben bei der kurzen Übersicht gesehen haben, ist der erste Plan, ein System von Normallinien zweiter Ordnung mit Hilfe von Eisenlinien zu schaffen, daran gescheitert, daß die verschiedenen Beobachter zu Werten kamen, die weit außerhalb der Genauigkeitsgrenze der einzelnen Meßreihen lagen. Der Grund wurde in der Lichtquelle selbst erkannt, der Poleffekt trat störend in Wirksamkeit (s. Ziff. 60). Aus diesem Grunde wurde schon im Jahre 1915 der zuerst von PFUND³ beschriebene „PFUND-Bogen“ als Normaleisenlichtquelle vorgeschlagen, und die I A U hat im Jahre 1922 folgenden Beschluß gefaßt: Das Eisenspektrum soll mit einem PFUND-Bogen erzeugt werden, der mit einem Strom von 210 bis 250 Volt Spannung und einer Stromstärke von 5 oder weniger Ampere betrieben werden soll, der Bogen soll eine Länge von 12 bis 15 mm haben, die Beobachtung soll senkrecht

¹ Proc Imp Ac Japan 4, S. 350 (1928)

² W. KOSTERS, P. LAMPE und A. P. WEBER, Phys. ZS. 29, S. 233 (1928)

³ Ap. J. 27, S. 297 (1908)

zur Achse des Bogens erfolgen und eine Zentralzone von maximal 1 bis 1,5 mm Ausdehnung umfassen. Den oberen (negativen) Pol soll ein Eisenstab von 6 bis 7 mm bilden, der untere (positive) Pol soll eine Peile von Eisenoxyd tragen.

Außer den Eisenlinien waren aber auch andere geeignete, leicht zu erzeugende Linien als Normalen zweiter Ordnung bestimmt und angenommen worden. Besonders im Orange und Rot des Spektrums war dies wegen der Linienarmut des Eisenbogens erwünscht. Hier boten sich ganz besonders die Neon- und Argonlinien dar (vgl. Ziff 65 und 67).

64 Die sekundären Normalen des Eisenbogenspektrums Auf die einzelnen Etappen, Verhandlungen und Vorschläge der Kommission der I A U braucht hier wohl nicht im einzelnen eingegangen zu werden. Seit der Versammlung im Jahre 1928 liegt ein Verzeichnis einer großen Zahl sekundärer Eisennormalen vor, die sich durch viele einzelne Untersuchungen als geeignet für diesen Zweck erwiesen haben. Die Wellenlängen dieser endgültig angenommenen Werte unterscheiden sich von den ursprünglichen Vorschlägen von 1922 im Betrage von wenigen Tausendstel, wie aus Tabelle 2 hervorgeht. In Tabelle 3 sind die endgültig angenommenen Wellenlängen mit Intensitätsangabe und neuerer Charakterisierung zusammengestellt¹.

Tabelle 2 Reduktion der auf das Normalsystem von 1922 [Lians I A U 1, S 41 (1922)] bezogenen Wellenlängen auf das Normalsystem von 1928

Wellenlängenbereich	Korrektion für λ_{1922}	Wellenlängenbereich	Korrektion für λ_{1928}
bis 4000 Å	-0,001 Å	6125 bis 6290	- 0,006
4000 bis 5600	-0,002	6290 „ 6455	0,007
5600 „ 5780	-0,003	6455 „ 6630	-0,008
5780 „ 5960	-0,004	6630 „ 6790	-0,009
5960 „ 6125	-0,005		

Die einzelnen Bezeichnungen bedeuten folgendes. Die Intensitätswerte sind Relativwerte, schwachste Linien mit 1, stärkste mit 10 bezeichnet. Die Buchstaben *r* und *R*, die als Zusatz bei den Intensitäten angefügt sind, bezeichnen enge bzw. weite Umkehrung und sind den Beobachtungen von BURNS entnommen. In der dritten Kolonne bezeichnen die Buchstaben a, b, c, d die Zugehörigkeit der Linien zu einer der von GALE und ADAMS² angegebenen vier Gruppen (vgl. Ziff 60).

65 Sekundäre Normallinien des Neon- und Kryptonspektrums Wie schon am Ende der vorigen Ziffer erwähnt wurde, war es wünschenswert, besonders im Orange und Rot wegen der Linienarmut des Eisenspektrums Linien anderer geeigneter Elemente als sekundäre Normalen zu bestimmen. Als besonders geeignet erscheinen für diesen Zweck Neon und Argon.

Die Neonlinien waren zur Zeit der Versammlung der I A U 1922 schon von mehreren Beobachtern mit guter Übereinstimmung gemessen worden, und so wurde 1922 eine Reihe von Neonlinien als sekundäre Normalen bestimmt und 1925 durch Hinzufügung einiger Linien vermehrt. Besondere Bedingungen für

¹ Die Anordnung der Tabelle ist in einer Hinsicht von der bei den Spektroskopikern sonst üblichen verschieden, insofern die Linien von kleinen nach großen Wellenlängen aufeinanderfolgen, während der Spektroskopiker die Anordnung mit wachsenden Wellenzahlen, die ja die Hauptrolle bei theoretischen Arbeiten spielen, vorzieht. Falls die Wellenlängenmessung selbst im Vordergrund steht, wie es bei diesen Normalliniensätzen der Fall ist, erscheint die in der Tabelle gegebene Anordnung allerdings zweckmäßig, immerhin wäre eine einheitliche Handhabung sehr zu begrüßen.

² Ap J 35, S 10 (1912), ST JOHN u L W WARE, ebenda 36, S 14 (1912), 37, S 391 (1913), 39, S 5 (1913), H D BABCOCK, Phys Rev (2) 30, S 366 (1927), A S KING, Ap J 35, S 183, (1912).

Tabelle 3 Eisen-Normallinien zweiter Ordnung (1928)

λ I A	Int	Gruppe	λ I A	Int	Gruppe	λ I A	Int	Gruppe
3370,787	6		3824 444	6 R	a	4147,673	4	b
3401,522	4	b	3825,884	8 R	b	4156,803	4	b
3465,863	6 R	a	3827,825	6 R	b	4170 906	2	b
3476,705	5 r	a	3834,225	7 R	b	4175,640	4	b
3497,844	5	a	3839,259	5	a?	4184,895	4	b
3513,820	5	b	3840,439	6 R	b	4202,031	7 r	b
3521,264	5 r	b	3841,051	6 R	b	4203,987	3	b
3558,518	5	b	3843,259	5	b	4213,650	2	b
3565,381	6 R	b	3846,803	5	b?	4216,186	4	a
3576,760	4		3849,969	5	b	4219,364	5	b
3581,195	8 R	b	3850,820	5	b	4250,790	8	b
3584,663	5		3856,373	6 R	a	4260,479	10	d
3585,320	6 r	b	3859,913	7 R	a	4267,830	2	b
3586,114	5		3865,526	6 R	b	4271,764	8 r	b
3589,107	4	b	3867,219	3	b	4282,406	6	a
3608,861	6 R	b	3872,504	6 r	b	4285,445	2	b
3617,788	6	b	3873,763	4	b	4294,128	6	b
3618,769	6 R	b	3878,021	6 r	b	4298,040	2	
3621,463	6		3878,575	6 R	a	4305,455	2	b
3631,404	6 R	b	3886,284	7 R	a	4307,906	8 r	b
3647,844	6 R	b	3887,051	6 r	b	4315,087	5	a
3649,508	6		3888,517	7	b	4325,765	9 r	b
3651,469	6	b	3895,658	5 r	a	4337,049	5	b
3669,523	6	b	3899,709	6 r	a	4352,737	4	a
3676,314	6	b	3902,948	7 r	b	4358,505	2	b
3677,630	6		3906,482	5 r	a	4369,774	3	b
3679,915	5 r	a	3907,937	3	b	4375,932	5	a
3687,458	6 R	b	3917,185	5	b	4383,547	10 R	b
3695,054	3	b	3920,260	6 r	a	4390,954	3	b
3704,463	5	b	3922,914	6 R	a	4404,752	8 r	b
3705,567	6 R	a	3927,922	6 r	a	4408,419	4	b
3719,935	8 R	a	3930,299	7 R	a	4415,125	8 r	b
3722,561	6 R	a	3935,815	4	b	4422,570	4	b
3724,380	6	b?	3940,882	4	b	4427,312	5	a
3727,621	6 R	b	3942,413	3	b	4430,618	4	b
3732,399	6	b	3948,779	4	b	4442,343	5	b
3733,319	6 R	a	3956,681	4	b	4443,197	3	b
3734,867	9 R	b	3966,066	7	b	4447,722	5	b
3737,133	7 R	a	3967,423	4	b	4454,383	3	b
3738,308	4	b	3969,261	7 r	b	4459,121	5	b
3748,264	6 R	a	4005,246	7	b	4461,654	4	a
3749,487	8 R	b	4014,534	4	b	4466,554	5	b
3758,235	7 R	b	4045,815	8 R	b	4489,741	3	a
3760,052	5	b	4063,597	8 R	b	4494,568	5	b
3763,790	6 R	b	4066,979	4	b	4517,530	2	d?
3765,542	6	b	4067,275	3	b	4528,619	7	b
3767,194	6 R	b	4071,740	7 R	b	4531,152	5	b
3787,883	6 R	b	4107,492	5	b	4547,851	3	b
3790,095	4	b	4114,449	4	b	4592,655	4	b
3795,004	6 r	b	4118,549	6	b	4602,944	4	b
3797,517	5	b	4121,806	2	b	4647,437	4	b
3798,513	6 r	b	4127,612	4	b	4667,459	4	b?
3799,549	6 r	b	4132,060	7	b	4678,852	5	b?
3805,345	6	b	4134,681	5	b	4691,414	4	b?
3815,842	7 R	b	4143,871	7	b	4707,281	5	d

Tabelle 3 (Fortsetzung)

λ I A	Int	Gruppe	λ I A	Int	Gruppe	λ I A	Int	Gruppe
4710,286	3	b	5167,491	8	a	5580,763	6	d
4733,596	3	b	5168,901	3	a	5615,652	6	d
4741,533	3	b	5171,599	7	a	5624,549	5	d
4745,806	3	b	5198,714	4	b	5658,826	4	d
4772,817	3	b	5202,339	5	b	5662,525	3	d
4786,810	3	b	5216,278	5	a	6027,057	2	b
4789,654	3	b	5227,192	8	a	6065,487	4	b
4859,748	5	d	5242,495	3	a?	6136,620	4	b
4878,218	5	d	5250,650	3	b	6137,696	4	b
4903,317	5	d	5270,360	8	a	6191,562	5	b
4918,999	8	d	5307,365	2	a	6230,728	5	b
4924,776	3	b	5328,534	4	a	6252,561	4	b
4939,690	3	a	5341,026	5	a	6265,140	3	b
4966,096	5	d	5371,493	7	a	6318,022	4	b
4994,133	3	a	5397,131	6	a	6335,335	4	b
5001,871	5	d	5405,778	6	a	6393,605	5	b
5012,071	4	a	5429,699	6	a	6421,355	4	b
5041,759	4	a	5434,527	6	a	6430,851	5	b
5049,825	5	b	5446,920	6	a	6494,985	5	b
5051,636	4	a	5455,613	6	a	6546,245	5	b
5083,342	4	a	5497,519	4	a	6592,919	5	b
5110,414	4	a	5501,469	4	a	6663,446	4	b
5123,723	4	a	5506,782	4	a	6677,993	5	b
5127,363	3	a	5569,625	5	d			
5150,843	4	a	5572,849	5	d			

die Erzeugung dieser Linien wurden nicht gegeben. Es hatte einer gewissen Vorsicht entsprochen, wenn die Interferenzfähigkeit der Linien vorgeschrieben worden wäre. Durch große Stromdichte, lange Schichtdicke und hohe Temperatur können auch diese Neonlinien eine relativ große Breite erhalten, ebenso ist die Selbstumkehr, die bei diesen Linien leicht auftritt, unter Umständen ebenfalls störend. Die Linie 6402 Å, bei der dies relativ am leichtesten auftritt, ist allerdings von vornherein nicht in die Liste der sekundären Normalen aufgenommen worden.

Die im Rot und Beginn des Ultrarot liegenden Argonlinien, die ebenfalls sehr günstig waren, wurden bisher noch nicht zur Wahl als sekundäre Normalen vorgeschlagen, die einzelnen Meßreihen der verschiedenen Beobachter zeigen auch noch zu große Abweichungen, als daß sich dies rechtfertigen ließe.

Tabelle 4 Neonnormalen (unverändert seit 1922)

5852,488	6074,337	6266,495	6532,882	7032,412
5881,896	6096,163	6304,789	6598,953	7173,938
5944,834	6143,062	6334,428	6678,276	7245,165
5975,534	6163,594	6382,991	6717,042	7535,785
6029,998	6217,280	6506,528	6929,466	

Dagegen wurden die im Wellenlängengebiet 4273 bis 4502 Å liegenden, durch große Scharfe ausgezeichneten Linien des Kryptonspektrums von der I A U im Jahre 1932 als sekundäre Normalen angenommen.

In den Tabellen 4 und 5 sind die Neon- und Kryptonnormalen zusammengestellt. Für die letztgenannten wurden außer den international angenommenen Wellenlängen die Messungen von drei Beobachtern angeführt, um die gute Übereinstimmung vor Augen zu führen.

66 Normallinien im Sonnenspektrum Für die Astrophysik ist außer den bisher behandelten Lichtquellen ganz besonders auch das Sonnenspektrum von wesentlicher Bedeutung, und deshalb sah es die I A U auch als ihre Aufgabe an, ein Normalliniensystem im Sonnenspektrum zu schaffen. Mit dieser Aufgabe wurde schon 1925 begonnen, wobei sich auch ganz besonders das Mt Wilson-Observatorium beteiligt hat. Unter Zugrundelegung der sekundären Standardlinien von 1922 wurden eine Reihe von geeigneten Sonnenlinien festgelegt und relativ zu diesen noch andere Sonnenlinien bestimmt. Durch Entwurf einer Korrektionstabelle für die Wellenlängenunterschiede der ursprünglichen ROWLANDSchen Werte war es möglich, diese ausgedehnten, schon vorliegenden Messungen zu verwerten. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist niedergelegt in der wertvollen umfangreichen Veröffentlichung der Carnegie Institution of Washington vom Jahre 1928 „Revision of Rowlands Preliminary Tables of Solar Spectrum Wave-Lengths (Mitarbeiter CH E ST JOHN, CH E MOORE, L M WARE, E F ADAMS, H D BABCOCK)“.

Die Veröffentlichung von ROWLANDS P T begann im Jahre 1895. Wir haben schon in der geschichtlichen Übersicht das für die Entwicklung der Spektroskopie und der Physik der Sonne so eminent wichtige Werk näher besprochen und gesehen, weshalb die Wellenlängenwerte des ROWLANDSchen Systems nicht als Normalwerte beibehalten werden konnten. Nachdem nun im Jahre 1907 das auf den Wert der roten Kadmiumlinie gegründete internationale Wellenlängensystem festgelegt war, erschien eine Revision des großen Standardwerkes als wichtige Aufgabe der Heliophysiker. In der eben erwähnten Revision des Mt Wilson-Observatoriums ist diese Aufgabe restlos durchgeführt. Die Resultate fußen auf zwei unabhängigen Meßreihen. In jeder wurde eine große Zahl von Linien, die sich hinsichtlich Lage und Ungestörtheit für Normallinien eignen, ausgemessen. Ein 30- bzw 75-Fuß-Spektrograph in Verbindung mit dem 60- bzw 150-Fuß-Turmteleskop dienten der Untersuchung, wobei der PRUND-Bogen gleichzeitig mit dem von der Mitte der Sonnenscheibe emittierten Licht aufgenommen wurde. In einer zweiten unabhängigen Serie wurde das Sonnenspektrum mit dem Interferometer gemessen. Beide Serien wurden für die Bewegung der Erde korrigiert und zeigten nur kleine Abweichungen, die nur in wenigen Fällen 0,002 Å überschritten. Mit Hilfe dieser als Normalen dienenden Linien wurde dann eine viel größere Zahl durch Interpolation von Spektrogrammen großer Dispersion bestimmt, so daß es mit ihrer Hilfe möglich war, eine Korrektionskurve für die Wellenlängenunterschiede $\Delta\lambda = \lambda_{\text{Rowl}} - \lambda_{\text{IA}}$ in Funktion der Wellenlänge zu entwerfen. Die Abb 24 gibt ein stark verkleinertes Bild dieser Kurve. Der tatsächlich für die Korrektur verwendete Linienzug war im Original 4,5 m lang, und für den Ordinatenmaßstab war 0,001 Å = 2,5 mm. Auch aus der verkleinerten Reproduktion geht hervor, wie unregelmäßig die Korrektur $\Delta\lambda$ mit der Wellenlänge verläuft. In dieser Unregelmäßigkeit kommt zum Ausdruck, daß das ROWLANDSche Wellenlängensystem eben nicht so in sich zusammenhängend ist, wie ROWLAND selbst angenommen hat. Mit Hilfe dieser

Tabelle 5 Kryptonnormalen (1932)

λ_{IA}	JACKSON ¹	HUMPHRIES ²	MEGERS ³
4273,9702	,9702	,9705	,9696
4282,9688	,9689	,9686	,967
4318,5522	,5522	,5523	,552
4319,5800	,5801	,5798	,580
4362,6425	,6425	,6429	,6422
4376,1220	,1221	,1217	,122
4399,9674	,9673	,9675	,969
4453,9179	,9179	,9183	,9174
4463,6903	,6906	,6897	,690
4502,3546	,3548	,3546	,354

¹ (Noch nicht publiziert) Trans I A U 4, S 75 (1932)

² J Res Bur Stand 3 Res Pap Nr 245, S 1041 (1930)

³ Sc Pap Bur of Stand 1921, Nr 414

Bild dieser Kurve. Der tatsächlich für die Korrektur verwendete Linienzug war im Original 4,5 m lang, und für den Ordinatenmaßstab war 0,001 Å = 2,5 mm. Auch aus der verkleinerten Reproduktion geht hervor, wie unregelmäßig die Korrektur $\Delta\lambda$ mit der Wellenlänge verläuft. In dieser Unregelmäßigkeit kommt zum Ausdruck, daß das ROWLANDSche Wellenlängensystem eben nicht so in sich zusammenhängend ist, wie ROWLAND selbst angenommen hat. Mit Hilfe dieser

Korrektion konnten nun alle ROWLANDschen Wellenlangen verwertet werden, was insbesondere für die Zuordnung zu den Linien der Elemente von großer Wichtigkeit war

Die revidierte Tafel geht in vielen Beziehungen weit über die ROWLANDschen Tafeln hinaus. Erstens ist der beobachtete Wellenlangenbereich erheblich größer, während ROWLANDs Tafel mit der Wellenlänge 7330 abschließt, wird hier in einer besonderen Tafel (Table III, S 206) eine Vermessung des Sonnenspektrums von λ 7333 und λ 10218 Å gegeben. In der Tafel selbst werden außer der Wellenlänge, Intensität und Elementzugehörigkeit auch Aussagen über das Auftreten der betreffenden Linien im Sonnenfleckenspektrum gemacht. Ferner ist bei jeder Linie, soweit bekannt, Temperatur- und Druckklasse und außerdem

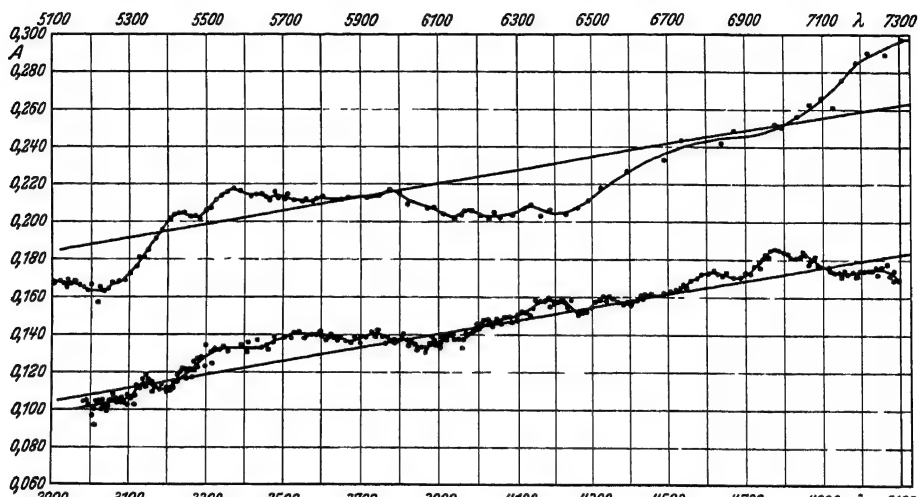


Abb 24 Wellenlängendifferenz $\Delta\lambda = \lambda_{\text{low}} - \lambda_{\text{LA}}$ in Funktion der Wellenlänge

das Anregungspotential angegeben. Für die Druckklassifikation sind fünf Gruppen a bis e vorhanden und nach den Ergebnissen von GALE und ADAMS, ST JOHN und WARE, BABCOCK und ferner KING angeführt¹. Die Temperaturklassifikation erfolgt ebenfalls nach den fünf Klassen I bis V nach KING. Außer der Haupttabelle und der schon oben erwähnten Tabelle werden in einer Tabelle Zusätze und Verbesserungen gebracht, eine weitere Tabelle stellt die stärksten, noch nicht identifizierten Sonnenlinien zusammen, eine vierte Tabelle enthält die normalerweise in der Chromosphäre allein vorhandenen Linien, und Tabelle 5 enthält eine Zusammenstellung der Koronallinien. In Tabelle 6 endlich sind die Termbezeichnungen für die Anregungspotentiale zusammengestellt. Dieses Tabellenwerk stellt eines der hervorragendsten Werke der Spektroskopie und der astrophysikalischen Literatur dar.

Was die Wellenlangenwerte anbelangt, so sind nicht unerhebliche Korrekturen anzubringen. Der „Revision“ liegt das Standardsystem vom Jahre 1922 zugrunde, das aber 1928 revidiert wurde (vgl. Ziff 64). Um Übereinstimmung mit den jetzt geltenden Werten zu erhalten, sind also die schon in Tabelle 2 angegebenen Korrekturen zu berücksichtigen.

Eine Liste international angenommener Sonnennormalen ist in Tabelle 6 zusammengestellt.

¹ A. H. PFUND, Ap J 27, S 297 (1908)

Tabelle 6 Sonnennormalen zweiter Ordnung¹

λ Å	El	Int	λ Å	El	Int	λ Å	El	Int
3592,027	V ⁺	2	4208,608	Fe	3	4630,128	Fe	4
3635,469	TiFe	4	4220,347	Fe	3	4635,853	Fe	2
3650,538		2	4233,612	Fe	6	4637,510	Fe	5
3672,712	Fe ⁻	3	4241,123	Fe ⁻	2	4638,017	Fe	4
3695,056	Fe	5	4246,837	Sc ⁺	5	4643,470	Fe	4
3710,292	Y ⁺	3	4257,661	Mn	2	4647,442	Fe	4
3725,496	Fe	3	4266,968	Fe	3	4656,474	Ti	3
3741,065	Li	4	4276,680	Fe	2	4664,794	-CrNa?	3
3752,418	Fe	3	4282,412	Fe	5	4678,172		3 ^N
3760,537	Fe	4	4291,472	Fe	2	4678,854	Fe	6
3769,994	Fe	4	4318,659	CaLi	4	4683,567	Fe	3
3781,190	Fe	3	4331,651	Ni	2	4690,144	-Fe	4
3793,876	CrFe	2	4337,925	Ti ⁺	4	4700,162		4
3804,015	Fe	3	4348,947	Fe	2	4704,954	Fe	4
3821,187	Fe	4	4365,904	Fe	2	4720,999	Fe	2
3836,090	Li ⁺	2	4389,253	Fe	2	4728,552	Fe	4
3843,264	Fe	4	4398,020	Y ⁺	1	4733,598	Fe	4
3897,458	Fe	2	4416,828	Fe ⁺	2	4735,848	Fe	3
3906,752	FeV	4	4425,444	Ca	4	4736,783	Fe	6
3916,737	Fe	5	4430,622	Fe	3	4741,535	Fe	3
3937,336	Fe	3	4439,888	Fe	1	4745,807	Fe	4
3949,959	Fe	5	4451,588	Mn	3	4772,823	Fe	4
3953,861	Fe	3	4454,388	Fe	3	4788,765	Fe	3
3960,284	Fe	4	4459,755	Cr—V	1	4789,658	Fe	3
3963,691	Cr	3	4470,485	Ni	2	4802,887	Fe	2
3977,747	Fe	6	4481,616	Fe	1	4824,143	Cr ⁺ —Fe	3
3991,121	Cr - Li ⁺	3	4502,221	Mn	2	4832,719	Ni—Fe	3
4003,769	FeCe ⁺ —Li	3	4508,289	Fe ⁺	4	4839,551	Fe	3
4016,423	Fe	2	4512,741	Ti	3	4939,694	Fe	3
4029,642	Fe Zr ⁺	5	4517,534	Fe	3	4983,260	Fe	3
4030,190	Fe	2	4525,146	Fe	5	4994,138	Fe	3
4037,121		2	4531,631	Fe	2	5002,798	Fe	2
4053,824	Li ⁺ Fe	3	4534,785	Li	4	5014,951	Fe	3
4062,447	Fe	5	4541,523	CrFe ⁺	2	5028,133	Fe	2
4073,767	FeCe ⁺	4	4547,853	Fe	3	5079,745	Fe	4
4079,813	Fe	3	4548,770	Li	2	5090,782	Fe	5
4082,943	MnV	4	4550,773	Fe	2	5109,657	Fe	2
4091,557	Fe	3	4563,766	Ti ⁺	4	5150,852	Fe	4
4094,938	Ca	4	4571,102	Mg	5	5159,065	Fe	2
4107,492	Fe	5	4571,982	Ti ⁺	6	5198,718	Fe	3
4120,212	Fe	4	4576,339	Fe ⁺	2	5225,534	Fe	2
4136,527	Fe	4	4578,559	Ca	3	5242,500	Fe	2
4139,936	Fe	6	4587,134	Fe	2	5253,468	Fe	2
4154,814	Fe	4	4589,953	Li ⁺	3	5273,389	Fe—Nd ⁺	2
4163,654	Li ⁺ Cr—Fe	4	4598,125	Fe	3	5288,533	Fe	2
4168,620	Fe	2	4602,008	Fe	3	5300,751	Cr	2
4178,859	Fe ⁺	3	4602,949	Fe	6	5307,369	Fe	3
4184,900	Fe, Cr	4	4607,654	Fe	4	5322,049	Fe	3
4191,683	Fe	3	4617,276	Ti	3	5332,908	Fe	4
4198,638	V—Fe	3	4625,052	Fe	5	5348,326	Cr	4

¹ Die Intensitätsangabe wurde ROWLANDS Prel Table entnommen. Die zweite Kolumne schließt sich an die „Revision of Rowl Prel Tab“ des Mt Wilson-Observatoriums an — Die Wellenlängen dieser Tabelle stimmen nicht mit denen der „Revision“ überein, da dieser die Standardlinien von 1922 zugrunde lagen. Die betreffenden Korrekturen sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 6 (Fortsetzung)

λ Å	El	Int	λ Å	El	Int	λ Å	El	Int
5365,407	Fe	3	6003,022	Fe	6	6240,653	Fe	3
5379,581	Fe	3	6008,566	Fe	6	6244,476	Fe	2
5389,486	Fe	3	6013,497	Mn	6	6245,620	Sc ⁺	1
5398,287	Fe	3	6016,647	Mn	6	6246,327	Fe	8
5409,799	Cr	4	6024,068	Fe	7	6247,562	Fe ⁺	2
5415,210	Fe	5	6027,059	Fe	4	6252,565	Fe	7
5432,955	Fe	2	6042,104	Fe	3	6254,253	Fe	5
5445,053	Fe	4	6065,494	Fe	7	6256,367	Fe Ni	6
5462,970	Fe	3	6078,499	Fe	5	6258,110	Ti	2
5473,910	Fe	3	6079,016	Fe	2	6258,713	Ti	3
5487,755	Fe	3	6082,718	Fe	1	6265,141	Fe	5
5501,477	Fe	5	6085,257	Ti—Fe	2	6270,231	Fe	3
5512,989	Ca	4	6086,288	Ni	1	6279,101	Atm O	3
5525,552	Fe	2	6089,574	Fe	1	6279,896	Atm O	2
5534,848	Fe ⁺	2	6090,216	V	2	6280,393	Atm O	2
5546,514	Fe	2	6093,649	Fe	3	6280,622	Fe	3
5590,126	Ca	3	6096,671	Fe	3	6281,178	Atm O	1
5601,286	Ca	3	6102,183	Fe	6	6281,956	Atm O	2
5624,558	Fe	4	6102,727	Ca	9	6283,796	Atm O	1
5641,448	Fe	2	6111,078	Ni	2	6289,398	Atm O	1
5655,500	Fe	2	6116,198	Ni	4	6290,221	Atm O	2
5667,524	Fe	2	6122,226	Ca	10	6292,162	Atm O	2
5679,032	Fe	3	6127,912	Fe	3	6292,958	Atm O	3
5690,433	Si	3	6128,984	Ni	1	6295,178	Atm O	3
5701,557	Fe	4	6136,624	Fe	8	6295,960	Atm O	3
5731,772	Fe	4	6137,002	Fe	3	6297,799	Fe	5
5741,856	Fe	2	6137,702	Fe	7	6299,228	Atm O	3
5752,042	Fe	4	6141,727	Ba ⁺ —Fe	7	6301,508	Fe	7
5760,841	Ni	2	6145,020		2	6302,499	Fe	5
5805,226	Ni	4	6149,249	Fe ⁺	2	6302,764	Atm O	2
5809,224	Fe	4	6151,623	Fe	4	6305,810	Atm O	2
5816,380	Fe	5	6154,230	Na	2	6306,565	Atm O	2
5853,688	Ba ⁺	5	6157,733	Fe	5	6309,886	Atm O	2
5857,459	Ca	8	6161,295	Ca	4	6315,314	Fe	2
5859,596	Fe	5	6162,180	Ca	15	6315,814	Fe	1
5862,368	Fe	6	6165,363	Fe	3	6318,027	Fe	6
5866,461	Ti	3	6166,440	Ca	5	6322,694	Fe	4
5867,572	Ca	2	6169,564	Ca	7	6327,604	Ni	2
5892,883	Ni	4	6170,516	Fe—Ni	6	6330,852	Fe	2
5898,166	Atm vv	4	6173,341	Fe	5	6335,337	Fe	6
5905,680	Fe	4	6175,370	Ni	3	6336,830	Fe	7
5916,257	Fe	3	6176,816	Ni	5	6344,155	Fe	4
5919,054	Atm vv	5	6180,209	Fe	5	6355,035	Fe	4
5919,644	Atm vv	7	6186,717	Ni	2	6358,687	Fe	6
5927,797	Fe		6187,995	Fe	4	6378,256	Ni	2
5930,191	Fe	6	6191,571	Fe	9	6380,750	Fe	4
5932,092	Atm vv	5	6200,321	Fe	6	6393,612	Fe	7
5934,665	Fe	5	6213,437	Fe	6	6400,009	Fe	8
5946,006	Atm vv	3	6215,149	Fe	5	6400,323	Fe	2
5952,726	Fe	4	6216,358	V	1	6408,026	Fe	5
5956,706	Fe	4	6219,287	Fe	6	6411,658	Fe	7
5975,353	Fe	3	6226,740	Fe	1	6419,956	Fe	4
5976,787	Fe	4	6229,232	Fe	1	6421,360	Fe	7
5983,688	Fe	5	6230,736	Fe—V	8	6430,856	Fe	5
5984,826	Fe	6	6232,648	Fe	3	6449,820	Ca	6

Tabelle 6 (Fortsetzung)

λ Å	El	Int	λ Å	El	Int	λ Å	El	Int
6455,605	Ca	2	6677,997	Fe	5	6986,579	Atm <i>wv</i>	3N
6456,391	Fe ⁺	3	6717,687	Ca	5	6988,986	Atm <i>wv</i>	3
6471,668	Ca	5	6810,267	Fe	3	7022,957	Fe	2
6475,632	Fe	2	6858,155	Fe	2	7023,504	Atm <i>wv</i>	2
6482,809	Ni	1	6870,946	Atm O	8	7027,478	Atm <i>wv</i>	2
6493,788	Ca	6	6879,928	Atm O	6	7034,910	—Fe	2N
6494,994	Fe	8	6918,122	Atm O	9	7122,206	Ni	4
6498,945	Fe	1	6919,002	Atm O	9			
6499,654	Ca	4	6923,302	Atm O	9			
6516,083	Fe ⁺	2	6924,172	Atm O	9			
6518,373	Fe	2	6928,728	Atm O	4			
6569,224	Fe	5	6934,422	Atm O	2			
6592,926	Fe	6	6959,452	Atm <i>wv</i>	3			
6609,118	Fe	3	6961,260	Atm <i>wv</i>	4			
6643,638	Ni	5	6978,862	Fe	2			

67 Normalen zweiter Ordnung für das kurz- und das langwellige Gebiet (unter 3370 und über 6750 Å) sind mangels genügend zahlreicher Einzelmessungen noch nicht international angenommen worden. Es sind aber schon so umfangreiche Vorarbeiten durchgeführt worden, daß mit einer endgültigen Festlegung geeigneter Normalen auch in diesen Spektralgebieten für die allernächste Zeit zu rechnen sein dürfte.

Im ultravioletten Gebiet existieren vorzügliche Messungen von BURNS und WALTERS sowie C V JACKSON, die in dem Spektralintervall 2327 bis 3356 Å zum Teil gute Übereinstimmung zeigen, aber nicht in dem Maße, wie man es von Normalen zweiter Ordnung erwarten kann. Eine noch weiter in das Ultraviolett reichende Meßreihe an einem Vakuum-Eisenbogen geht auf BURNS und WALTERS zurück und reicht bis zu 2157 Å.

Der Vakuumbogen hat gegenüber dem gewöhnlichen Luftbogen mannigfache Vorteile, die ihn für eine Standardlichtquelle vorteilhaft erscheinen lassen. Er gibt scharfere Linien und weniger Selbstumkehr und ist weitgehend frei von Druckverschiebungen und Polseffekt. Vom astrophysikalischen Standpunkt ist seine Anwendung auch deshalb empfehlenswert, weil seine Bedingungen mehr denen des Sonnenspektrums entsprechen. Für das äußerste Ultraviolett kommt nur der Vakuumbogen in Betracht, und so wäre es nur konsequent, wenn diese Lichtquelle für das ganze Spektralgebiet als Normallichtquelle adoptiert würde. Diese Bemerkung hat auch Gültigkeit für die Lichtbogen mit anderen Metallen. Für die Messungen im langwelligen Rot und Beginn des Ultrarot liegen ebenfalls noch keine genügend umfangreiche Meßreihen an Laboratoriumslichtquellen vor. In diesem Spektralgebiet ist ganz besonders auch der Umstand störend, daß die einzelnen Spektren im allgemeinen wenig linienreich sind, so daß es schwer ist, Normalen im vorgeschenen Abstand von 50 Å zu schaffen. Es wird hier aller Wahrscheinlichkeit nach ein Normalsystem nur durch Verwendung verschiedener Lichtquellen aufgestellt werden können. Wie im Orange und kurzwelligen Rot das Neonspektrum ausgezeichnet als Normalspektrum geeignet ist, so wird in dem Gebiet von 6965 Å bis 9212 Å das Argonspektrum eine Reihe allerdings nicht dicht genug liegender Linien liefern können. Die beiden vorliegenden Meßreihen von MEISSNER¹ und von MEGGERS² zeigen schon eine sehr gute Übereinstimmung, und es ist bei dem heutigen Stand der Ultrarotphotographie kein Problem mehr,

¹ Ann d Phys 51, S 95 (1916)

² Sc Pap Bur of Stand 17, S 193 (1921), Phys Rev (2) 18, S. 160 (1921).

diese Messungen mit der gleichen Genauigkeit auszuführen, wie es bei Neon möglich war

Für das Sonnenspektrum liegen die Verhältnisse etwas günstiger. Hier liegen schon interferometrische Messungen von atmosphärischen und Sonnenlinien bis zur Wellenlänge 9000 Å vor [BABCOCK, Ap J 53, S 140 (1927)] und darüber hinaus noch weniger genaue Messungen bis etwa 11200 Å. Eine Tabelle dieser vorübergehend als Normalen dienenden Linien findet man in den Trans-Internat Astri Union 4, S 83 (1932). Für die endgültige Annahme als Normal-Sonnenlinien sind aber noch Kontrollmessungen unumgänglich notwendig.

68 Normalen dritter Ordnung oder tertiäre Normalen werden die Linien genannt, deren Wellenlänge durch Interpolation zwischen Normalen zweiter Ordnung mit Gittern oder andern Spektralapparaten gewonnen worden sind. Als tertiäre Normalen sind also auch solche Wellenlängen anzusprechen, die zwar mit interferometrischen Methoden bestimmt, aber an sekundäre Normalen angeschlossen wurden. Ganz besonders wird man hierzu auch solche interferometrische Messungen zu rechnen haben, bei denen die Korrektur für den Phasensprung (s. Ziff 51) mit Hilfe bekannter Normalenlinien gewonnen wurde.

Man kann darüber im Zweifel sein, ob es für die exakte Wellenlängenmessung nötig ist, tertiäre Normalen international festzulegen, da nämlich die sekundären Normalen schon sehr eng liegen, in einem mittleren Abstand von 50 Å, wird eine Interpolation unbekannter Linien mit Hilfsmitteln genügend großer Dispersion immer möglich sein, für spezielle Zwecke allerdings kann die Kenntnis noch enger liegender Normalen von Wert sein.

Ein Wellenlangensystem von Normalen dritter Ordnung ist tatsächlich schon bei der Versammlung der I A U in Rom 1922 international angenommen worden und umfaßt etwa 300 Eisenlinien. Wie schon in Ziff 64 erwähnt wurde, mußten die damals festgesetzten Normalen zweiter Ordnung noch eine zum Teil wesentliche Korrektur erfahren, die in dem Wellenlangensystem von 1928 berücksichtigt wurde. Außerdem sind ursprünglich als tertiäre Normalen bestimmte Linien in die Reihe der sekundären gerückt. Ein international angenommenes System tertiärer Normalen besteht zur Zeit nicht, da sich die Beschlüsse von 1928 nur auf die sekundären beziehen. Immerhin ist es möglich, die Tabelle von 1922 mit den in unserer Tabelle 2 gegebenen Korrekturen zu versehen, um so einem Bedürfnis enger liegender Normalen gerecht zu werden. Diesen Zwecken soll die Tabelle 7 dienen, die wie die Tabelle 3 eingerichtet ist und zusammen mit den Normalen zweiter Ordnung der Tabelle 3 ein engliegendes Normalensystem bietet. An den Wellenlängen dieser Tabelle durfte sich in der Folgezeit wenig ändern.

Für viele Zwecke können die Normalen des Eisenbogens auch durch die an andern Spektren gewonnenen Messungen ersetzt werden, sofern es nicht auf eine große Meßgenauigkeit ankommt. Es gibt ausgezeichnete Messungen der Edelgase, von Kadmium, Kupfer, Titan und vielen andern Elementen, die nach den Umständen ausgesucht werden können. Besonders für den Bereich kurzer und langer Wellenlängen wird man auf eine entsprechende Auswahl angewiesen sein.

69 Gesetzmäßigkeiten der Spektren und ihre Anwendung auf die Prüfung eines Normalliniensystems. Die großen Fortschritte in der Erforschung der Gesetzmäßigkeiten von Linienspektren haben nicht nur ein atomphysikalisches Interesse, sondern können auch für die Kontrolle eines Normalensystems, sei es auch nur in geringem Umfange, herangezogen werden. Dies ist dadurch möglich, daß nach dem Kombinationsprinzip von RITZ bei der Kombination eines vielfachen Terms mit anderen Termen in verschiedenen Teilen des Spektrums Schwingungsdifferenzen auftreten können, deren Konstanz ein Maß für

Tabelle 7 Eisennormalen dritter Ordnung (Werte von 1922 korr auf Skala 1928)

λ I A	Int	Gruppe	λ I A	Int	Gruppe	λ I A	Int	Gruppe
3379,022	4		3794,341	3		4367,581	2	b
3380,114	5		3806,701	6		4387,897	2	b
3392,656	5		3807,540	4		4407,714	2	b
3396,980	3	b	3808,731	2		4435,152	2	a
3399,336	6	d	3814,526	2		4476,022	7	b
3401,522	4	b	3821,181	6		4490,086	2	
3402,261	4	b	3833,312	6 R	b	4514,191	2	b
3407,462	7	d	3852,576	5		4587,134	2	b
3413,135	7	d	3871,751	2		4602,006	2	b
3417,844	6		3883,283	2		4619,295	4	b?
3418,510	5		3884,361	2	b	4630,126	3	b
3424,288	6		3903,902	3	b	4632,916	3	b
3427,121	6	d	3910,847	2	b	4638,017	4	b?
3445,152	4	d	3925,946	3	b	4654,502	4	b
3447,281	6		3932,629	3	b	4673,171	3	
3450,331	6		3937,331	2	b	4736,780	5	d
3458,305	3	b	3952,605	4	b	4788,760	2	b
3485,342	6	d	3956,460	4	b	4802,884	2	
3489,672	4		3971,326	4	b	5041,074	3	a
3495,290	4	b	3977,745	5	d	5098,704	4	b
3497,109	4		3981,775	3	b	5151,914	3	a
3506,500	5	b	3983,961	5	b	5192,361	8	d
3529,820	4		3986,176	3	b	5232,955	8	d
3541,087	6		3990,379	1	b	5266,567	8	d
3542,079	5		3997,396	6	d	5269,538	10	a
3545,641	5		4009,716	5	a	5302,313	5	d
3556,880	6 r		4021,870	5	d	5324,194	6	d
3582,201	4		4031,964	2	b	5332,901	2	a
3594,633	5		4044,614	2	b	6127,909	2	b
3603,206	5		4062,446	4	b	6157,728	2	b
3606,681	5	d	4067,983	5	b	6165,362	2	b
3623,187	5		4074,790	3	d?	6173,338	2	b
3625,148	5		4076,640	5		6200,317	2	b
3630,351	3		4085,009	2	b	6219,284	3	b
3632,040	6		4095,975	3	b	6254,261	3	b
3638,299	6		4098,183	3	b	6297,796	3	b
3640,391	6	d	4100,741	2	b	6322,689	3	b
3645,824	4		4109,807	4	b	6344,154	2	b
3659,519	5		4120,210	2	b	6380,746	3	b
3684,111	5	b	4122,521	2	b	6462,730	4	b
3690,730	2	b	4132,903	3	b	6475,631	3	b
3702,033	1		4137,001	3	b	6518,374	3	b
3707,049	3		4143,419	5	b	6575,021	3	b
3711,225	2	b	4154,502	4	b	6609,117	4	b
3715,914	2	b?	4154,502	4	b	6750,156	4	b
3742,622	1		4177,597	2	a			
3745,563	7 R	a	4181,759	6	b			
3745,902	5 r	a	4191,441	6	d			
3753,614	6	d	4226,424	2	b			
3756,941	3	b	4233,613	6	d			
3774,826	2		4245,259	2	b			
3776,456	2	b	4266,968	2	b			
3781,189	1		4327,099	2	b			
3785,949	5		4346,559	2	b			
3786,679	3		4351,550	2	b			

die Meßgenauigkeit sein kann, sofern man die strenge Gültigkeit des Kombinationsprinzips postuliert. Besonders bei komplizierten Multiplettstrukturen kann eine solche Prüfung mit Vorteil angewendet werden. Solche Kontrollen wurden für das Neonspektrum von MEISSNER¹, von MEGGERS und BURNS² und für das Eisenspektrum von MEGGERS³ durchgeführt.

Solange es dabei bleibt, daß durch dieses Verfahren nur eine Prüfung von Meßreihen durchgeführt wird, ist dagegen kein Einwand zu erheben. Wenn aber, wie es auch schon vorgeschlagen wurde, es dazu kommen sollte, daß man auf diesem Wege, ausgehend von bekannten Normalen und bekannten Mittelwerten der Termdifferenzen, die genauen Wellenlängen bisher nur ungenau gemessener Linien erschlosse, die dann offenbar die Rolle von tertiären Normalen zu übernehmen hätten, so wird man vom Standpunkt unvoreingenommener strenger Meßkunst sich ablehnend verhalten müssen. Nur in besonderen Fällen wird man einen solchen Weg als Notmaßnahme einschlagen dürfen. Auch wenn man die strenge Gültigkeit des Kombinationsprinzips annimmt, an der zu zweifeln wir nicht den geringsten Grund haben, so konnte doch bei der Berechnung einer Wellenlänge auf die angegebene Weise ein falscher Wert gefunden werden, wenn etwa die betreffende Linie durch schwache, theoretisch nicht vorauszusichende Begleiter in Wirklichkeit verschoben wäre.

Vorschläge in dieser Richtung wurden besonders für das Eisenspektrum gemacht. Es sei diesbezüglich verwiesen auf Trans Internat Astr Union 4, S 65 ff (1932), wo sich auch eine Termtabelle des Fe I-Spektrums auf Grund der Arbeiten von MEGGERS, BABCOCK, BURNS und WALTERS findet.

70 Umrechnung von Wellenlängen aus dem ROWLANDSchen in das Internationale System. Wenngleich durch zahlreiche Arbeiten die Spektrallinien vieler Elemente schon im Internationalen System gemessen worden sind und die Zeit wohl nicht mehr fern ist, wo für alle Elemente Neumessungen vorliegen werden, so besteht heute doch noch manchmal das Bedürfnis, eine Umrechnung alterer, fast durchweg auf das ROWLAND-System bezogener Messungen vornehmen zu können. Dies gilt ganz besonders auch für astrophysikalische Beobachtungen. Wie schon oben mehrmals auseinandergesetzt wurde, ist eine solche Umrechnung durchaus nicht leicht, da das ROWLANDSche System durch große Unregelmäßigkeiten ausgezeichnet ist. Dazu kommt noch, daß bei vielen älteren Messungen oft nicht mehr zu eruieren ist, ob das Sonnenspektrum selbst als Normalspektrum gedient hat oder ob etwa gegen Eisenlinien gemessen wurde, für deren Wellenlängen die Preliminary Table-Werte genommen wurden.

Nimmt man die Wellenlängen der Preliminary Table als Repräsentanten des ROWLANDSchen Systems, so kann man unter Heranziehung von Messungen im Internationalen System eine Tabelle der Differenzen $\lambda_{\text{Rowl}} - \lambda_{\text{IA}}$ aufstellen und etwa durch graphischen Ausgleich zu mittleren Korrektionswerten gelangen. In dieser Weise hat zuerst KAYSER eine Umrechnungstabelle aufgestellt. Für 125 Metalllinien wurde die Differenz Rowl - I A gebildet und die Korrekturen graphisch ermittelt. Dieses Verfahren ist, wie auch KAYSER⁴ selbst angibt, nicht einwandfrei, da ein Vergleich von FRAUNHOFERSchen Linien mit den entsprechenden Linien des Bogens nicht statthaft ist. Nur für Ansprüche an geringe Genauigkeit wird dieses Verfahren genügen. Einwandfrei ist das in Ziff 66 beschriebene Vorgehen, bei dem es sich um den Vergleich von Sonnenlinien handelt.

¹ Phys Z 17, S 549 (1916)

² Sc Pap Bur of Stand 18, S 188 (1922), K BURNS, J Opt Soc Amer 11, S 301 (1925)

³ Ap J 60, S 60 (1924)

⁴ Handb d Spektroskopie 6

In umfassender Weise nahm auch HARTMANN¹ das Problem der Umrechnung vor. Durch Relativmessungen einer Reihe von Linien des Eisenbogens gegen FRAUNHOFERSche Linien wurde ein Reduktionsfaktor für die Umwandlung ermittelt und die Ergebnisse tabellarisch niedergelegt. Auf Einzelheiten dieser Arbeit soll hier nicht eingegangen werden, da ihre Ergebnisse bei der erfolgten Weiterentwicklung der Wellenlängenmessungen nicht mehr so von Bedeutung sind wie zu der Zeit ihrer Entstehung.

Im allgemeinen wird man bei derartigen Umrechnungen keine große Genauigkeit anstreben, vielmehr wird man sich mit $\pm 0,02 \text{ \AA}$ begnügen. In diesem Falle ist auch das KAYERSche Verfahren unverfänglich, und eine nähere Prüfung der Umrechnungstabellen von KAYSER und HARTMANN und der aus der Abb. 24 folgenden Korrekturen zeigt, daß innerhalb der genannten Fehlergrenze die drei Korrekturen gut übereinstimmen. Die folgenden Tabellen, die auf Grund der angegebenen Quellen aufgestellt wurden, werden im allgemeinen vollkommen ausreichen. Bei der Benutzung der Tabellen ist aber immer darauf zu achten, ob der zu reduzierende Wellenlängenwert bei Gittermessung in erster oder in höherer Ordnung gewonnen wurde, denn dadurch verändern sich die anzubringenden Korrekturen oft stark.

Tabelle 8 Umrechnung des ROWLANDschen Wellenlängensystems auf das Internationale
Differenzen $\lambda_{\text{Rowl}} - \lambda_{\text{IA}}$

Nach Revision P. I.		Nach J. HARTMANN		Nach H. KAYSER	
Wellenlänge	Differenz	Wellenlänge	Differenz	Wellenlänge	Differenz
				1900	
				2150	0,07
		2300		2400	0,08
		2535	0,09	2600	0,09
2935		2800	0,10	2850	0,10
3210	0,11	3075	0,11	3100	0,11
3485	0,12	3350	0,12	3300	0,12
3760	0,13	3600	0,13	3550	0,13
4035	0,14	3875	0,14	3850	0,14
4310	0,15	4150	0,15	4020	0,15
4585	0,16	4400	0,16	4250	0,16
4860	0,17	4700	0,17	4450	0,17
5135	0,18	4975	0,18	4800	0,18
5400	0,19	5250	0,19	5150	0,19
5685	0,20	5510	0,20	5500	0,20
5960	0,21	5750	0,21	5800	0,21
6235	0,22	6020	0,22	6100	0,22
6510	0,23	6300	0,23	6430	0,23
6785	0,24	6550	0,24	6750	0,24
7050	0,25	6825	0,25	7000	0,25
7325	0,26	7100	0,26		
		7350	0,27		

d) Literaturverzeichnis.

Lichtbrechung durch Prismen.

Allgemeine Werke

Handb. der Experimentalphysik (WIEN-HARMS) XXI, S. 212 (1927)

Handb. der Physik (GEIGER-SCHEEL) XVIII, S. 225 (1927)

Lord RAYLEIGH, Scientific Papers Vol. I, Cambridge 1899

Grundzüge der Theorie der optischen Instrumente von S. CZAPSKI und O. EPPENSTEIN, 3. Aufl. 1924

¹ Astr. Mitt. Sternw. Gött. XIX (1916)

- H KAYSER, Handb der Spektroskopie I, Kap 3 (Verfasser H KONEN), hier auch ältere Literatur
 E C C BALY, Spectroscopy, 3^d ed in 4 vol New York and London I 1924, II 1927, III 1927 Deutsche Übersetzung der ersten Auflage von R WACHSMUTH Berlin Julius Springer 1908

Beugungsgitter

Allgemeine Werke

- Handb der Experimentalphysik (WIEN-HARMS) XXI, S 260 (1927), Theorie XXI, S 278 (1927)
 Handb der Physik (GEIGER-SCHEEL) Bd XX
 H KAYSER, Handb der Spektroskopie I, Kap 4
 E C C BALY, Spectroscopy, 3^d ed (s oben)

Spezielle Abhandlungen

Ebene Gitter

- J FRAUNHOFER, Denkschr d K Ak d Wiss Munchen 8, S 1 (1821/22), Gilberts Ann d Phys 74, S 337 (1823)
 Lord RAYLEIGH, Phil Mag (4) 47, S 81 u 193 (1874)
 H A ROWLAND, Johns Hopkins Un Circ 1882, Nr 16, S 248, Phil Mag (5) 13, S 469 (1882), Nature 26, S 211 (1882)

Konkavgitter

- H A ROWLAND, Amer J of Sc (3) 26, S 87 (1883), Phil Mag 16, S 197 (1883), Astr and Astroph 12, S 129 (1893)
 J S AMES, Johns Hopkins Un Circ 8, Nr 73, S 69 (1889)
 C RUNGE, in Kaysers Handb der Spektroskopie I, Kap 4, S 452 (1900) (Theorie vom Jahre 1888)
 C RUNGE und R MANNKOPFF, Z Phys 45, S 13 (1927)

Gitteraufstellung

- H A ROWLAND, l c
 J S AMES, Johns Hopkins Un Circ 8, S 69 (1889)
 C RUNGE u F PASCHEN, Anh z d Abh d Berl Akad d Wiss 1902
 C ABNEY, Phil Trans 177, S 457 (1886)
 H KONEN, Z f wiss Photogr 1, S 325 (1903)
 H KAYSER u P EVERSHEIM, Phys Z 14, S 1001 (1913)
 A EAGLE, Ap J 31, S 120 (1910)
 F L O WADSWORTH, Ap J 3, S 56 (1896)
 C RUNGE u F PASCHEN, Wied Ann 61, S 641 (1897)
 W F MEGGERS u K BURNS, Sc Pap Bur of Stand 18, S 185 (1922)

Gitterfehler Fokale Eigenschaften

- H A ROWLAND, Astr and Astroph 12, S 129 (1893)
 A CORNU, CR 80, S 645 (1875), 116, S 1215 (1893), 117, S 1032 (1893)
 C M SPARROW, Ap J 49, S 65 (1919)

Geister

- G QUINCKE, Pogg Ann 146, S 1 (1872)
 C S PEIRCE, Amer J of Math 2, S 330 (1879)
 H A ROWLAND, Astr and Astroph 12, S 129 (1893)
 TH LYMANN, Phys Rev 12, S 1 (1901) 16, S 257 (1903)
 C RUNGE, Ann d Phys 71, S 178 (1923), J Opt Soc Amer 6, S 429, (1922)
 E BUCHWALD, Ann d Phys 80, S 279 (1926)

Stufengitter (ECHELON)

- A A MICHELSON, Ap J 8, S 36 (1898), J de Phys (3) 8, S 305 (1899)
 E GEHRCKE, Ann d Phys 18, S 1074 (1905)
 — Anwendung der Interferenzen Braunschweig 1906
 R A HOUSTON, Phil Trans 7, S 456 (1904)
 B GALITZIN, Bull Acad Petersburg 5, S 76 (1905)
 F TWYMAN, Proc Opt Conv 1, S 53 (1905)
 M v LAUE, Phys Z 6, S 283 (1905)
 O OLDENBERG, Ann d Phys 67, S 253 (1922)
 H C VAN GEEL, Rev d'Opt 2, S 445 (1923)
 E LAU, Z f Phys 80, S 100 (1933)
 P GORLICH, Z f Phys 80, S 105 (1933)

LUMMER-GEHRCKE-Platte

- O LUMMER, Verh d Dtsch Phys Ges 3, S 85 (1901), Phys Z 3, S 172 (1902)
 O LUMMER u E GEHRCKE, Verh d Dtsch Phys Ges 4, S 337 (1902), Berl Akad Ber 2, S 11 (1902), Ann d Phys 10, S 457 (1903)
 E GEHRCKE, Verh d Dtsch Phys Ges 7, S 236 (1905)
 E GEHRCKE u O v BAEYER, Ann d Phys 20, S 269 (1906)
 E GEHRCKE und O REICHENHEIM, Verh d Dtsch Phys Ges 4, S 209 (1906)
 O v BAEYER, Verh d Dtsch Phys Ges 10, S 733 (1908), 11, S 118 (1909), Phys Z 9, S 831 (1908)
 E GEHRCKE, Verh d Dtsch Phys Ges 11, S 141 (1909)
 N GALLI u K FORSTIERLING, Phys Z 18, S 155 (1917)
 H P WARAN, London R S Proc A 100, S 419 (1922)
 E LAU, Z f Instrk 43, S 311 (1923)
 J K ROBERISON, J Opt Soc Amer 11, S 559 (1925)
 A SCHRAMM, Ann d Phys (4) 83, S 1161 (1927)

Interferometer nach FABRY und PEROT

- CH FABRY u A PEROT, Ann Chim Phys (7) 12, S 459 (1897), 16, S 115 u 289 (1899), 22, S 504 (1901), 24, S 119 (1901), 25, S 98 (1902) (Étalon), Ap J 15, S 73 u 261 (1901)
 CH FABRY, C R 140, S 848 (1905) (Spektrale Zerlegung)
 Loid RAYLIGH, Phil Mag (6) 11, S 685 (1906)
 CH FABRY u H BUISSON, C R 143, S 165 (1906), 144, S 1155 (1907), Ap J 28 S 169 (1908)
 A H PRUND, Ap J 28, S 197 (1908)
 H C RINISCHLER, Ap J 28, S 345 (1908)
 CH FABRY u H BUISSON, J de Phys (4) 7, S 169 (1908), 8, S 73 u 960 (1909), 9, S 197 (1910) (Anwendung auf FRAUNHOFERSche Linien), 9, S 298, 421 u 929 (1910)
 P P KOCH, Ann d Phys 34, S 377 (1911), Z f Instrk 31, S 378 (1911)
 E GEHRCKE u E LAU, Phys Z 31, S 973 (1930)
 E LAU, Ann d Phys 10, S 71 (1932)
 E LAU u E REICHLER, Z f Phys 63, S 313 (1931), 76, S 190 (1932)

Astro- und geophysikalische Anwendungen des Interferometers

- CH FABRY u H BUISSON, Ap J 33, S 406 (1911), Application to the Study of Nebulae
 H D BABCOCK, Ap J 57, S 209 (1923) (Grüne Nordlichtlinie)

Wellenlängenmessungen**Allgemeine Übersicht enthalten**

- Transactions of the International Astronomical Union I (1922), II (1925), III (1928), IV (1932)
 Kayser's Handb der Spektroskopie
 F C C BAILEY, Spectroscopy
 P REVERSHIM, Wellenlängenmessungen des Lichtes im sichtbaren und unsichtbaren Spektralbereich Sammlung Vukweg Nr 82 Braunschweig 1926

Druckverschiebung

- W J HUMPHREYS u J P MOHLER, Ap J 3, S 114 (1896), 4, S 249 (1896)
 W J HUMPHREYS, Ap J 6, S 169 (1897), 22, S 217 (1905), 26, S 18 (1907), 35, S 268 (1912)
 G E HAILE u N A KINI, Ap J 17, S 154 (1903)
 J A ANDERSON, Ap J 24, S 221 (1906)
 W G DUFFIELD, Ap J 26, S 375 (1907), Phil Trans A 208, S 11 (1908), 211, S 33 (1911)
 R ROSSI, London R S Proc A 83, S 414 (1910), Ap J 34, S 21 (1911)
 CH FABRY u H BUISSON, Ap J 31, S 112 (1910)
 H G GALL u W S ADAMS, Ap J 35, S 10 (1912), 37, S 391 (1913)
 A S KING, Ap J 35, S 183 (1912), 34, S 37 (1911)
 H D BABCOCK, Ap J 67, S 240 (1928)
 B I BARNES, Ap J 63, S 127 (1926)
 M PETERSEN u J B GREEN, Ap J 62, S 49 (1925)
 L E MITLER, Ap J 53, S 224 (1921)
 I H HAVFLOCK, Ap J 35, S 304 (1912)
 M KUIP (theoric), Z f Phys 79, S 495 (1932)

Poleffekt

- F GOOS, Ap J 38, S 141 (1913), Z f wiss Photogr 12, S 259 (1913)
 CH E Sr JOHN u H D BABCOCK, Ap J 42, S 231 (1915), 46, S 138 (1917)

- H NAGAOKA, Ap J 53, S 329 (1921)
 H G GALE u W T WHITNEY, Ap J 43, S 161 (1916)
 W T WHITNEY, Ap J 44, S 65 (1916)
 H G GALE, Ap J 45, S 142 (1917)
 F T HOLMES, Phys Rev (2) 35, S 652 (1930)
 R E HARRIES, Ap J 59, S 261 (1924)
 T ROYDS, Kodaikanal Bull 1916, Nr 38 u 40, Ap J 45, S 112 (1917)
 G S MONK, Ap J 57, S 222 (1923)
 M ADAM, Ann d Phys (5) 15, S 568 (1932)

Normalen zweiter Ordnung

Eisenbogen

- P EVERSHEIM, Ann d Phys (4) 30, S 315 (1909), Ap J 31, S 76 (1910), Ann d Phys (4) 36, S 1071 (1911), 45, S 454 (1914)
 CH FABRY u H BUISSON, Ap J 31, S 97 (1910)
 A H PFUND, Johns Hopkins Univ Circ (2) 2, S 29 (1910)
 H KAYSER, CH FABRY u J S AMES, Ap J 32, S 215 (1910), 33, S 85 (1911)
 F GOOS, Z f wiss Photogr 11, S 1 u 305 (1912), 12, S 259 (1913), Ap J 35, S 221 (1912), 37, S 48 (1913), 38, S 141 (1913), A N 199, S 33 (1914)
 H BUISSON u CH FABRY, Ann d Phys (4) 38, S 245 (1912)
 K BURNS, C R 156, S 1611 (1913), J de Phys (5) 3, S 457 (1913), Lick Bull 8, S 27 (1913), Sc Pap Bur of Stand Nr 251, Bull 12, S 179 (1915)
 H KAYSER, J S AMES, H BUISSON u F PASCHEN, Ap J 39, S 93 (1914)
 K BURNS, C R 160, S 243 (1915)
 K BURNS, W F MEGGERS u P W MERRILL, Bull Bur of Stand 13, S 245 (1916)
 W F MEGGERS u C C KIESS, Sc Pap Bur of Stand 1918, Nr 324
 CH E ST JOHN u H D BABCOCK, Ap J 53, S 260 (1921)
 W F MEGGERS, C C KIESS u K BURNS, Sc Pap Bur of Stand 19, S 263, Nr 478 (1924)
 G S MONK, Ap J 62, S 375 (1925)
 H D BABCOCK, Ap J 66, S 256 (1927), P Wallerath Ann d Phys 75, S 37 (1924), W Kleinewefers, Z f Phys 42, S 211 (1927)
 K BURNS, Publ Allegh Obs 6, S 141 (1927)
 K BURNS u F M WALTERS, Publ Allegh Obs 8, S 39 (1929) (Vakuumbogen)
 C V JACKSON, London R S Proc A 130, S 403 (1931), 133, S 553 (1931)

Neon

- K W MEISSNER, Ann d Phys (4) 51, S 95 (1916), 58, S 333 (1919)
 K BURNS, W F MEGGERS u P W MERRILL, Bull Bur of Stand 14, S 765 (1918)
 P WALLERATH, Ann d Phys (4) 75, S 37 (1924)
 H D BABCOCK, Ap J 66, S 256 (1927)
 G S MONK, Ap J 62, S 375 (1925)
 J G PRIEST, Bull Bur of Stand 8, S 539 (1912)

Titan

- FR L BROWN, Ap J 56, S 53 (1922)
 H CREW, Ap J 60, S 108 (1924)

Argon

- K W MEISSNER, Ann d Phys (4) 51, S 95 (1916)
 W F MEGGERS, Sc Pap Bur of Stand 17, S 193 (1921, Phys Rev (2) 18, S 160 (1921)

Krypton

- W F MEGGERS, Sc Pap Bur of Stand 1921, Nr 414
 A PÉRARD, C R 176, S 1060 (1923), 194, S 1633 (1932)
 C J HUMPHREYS, J Res Bur of Stand 3, Res Pap Nr 245, S 1041 (1930)
 C V JACKSON, Trans I A U 4, S 76 (1932), London R S Proc A 138, S 1471 (1932)

Kapitel 4

Sternspektrographie und Bestimmung von Radialgeschwindigkeiten.

Von

G. EBERHARD-Potsdam

Mit 27 Abbildungen

a) Allgemeine Prinzipien für die Konstruktion eines Sternspektrographen¹.

1. Mechanische Stabilität des Spektrographen Der Sternspektrograph unterscheidet sich prinzipiell nicht von einem Laboratoriumsspektrographen, er besitzt, wie dieser, Spalt, Kollimator, Prismen, Kamera und Kassette. Da ersterer aber unter anderen äußeren Verhältnissen benutzt wird als ein Laboratoriumsspektrograph, kommen einige zusätzliche Bedingungen hinzu, die erfüllt sein müssen, damit das Instrument unter diesen Verhältnissen fehlerfrei funktioniert. Der Sternspektrograph wird nämlich in Verbindung mit einem Fernrohr gebraucht, das die verschiedensten Lagen gegen den Horizont annehmen kann, so daß der Spektrograph keine feste, unveränderliche Aufstellung hat wie im Laboratorium. Infolgedessen muß der mechanische Aufbau so stabil sein, daß der Spektrograph in allen Lagen und bei allen Lagenänderungen unverändert bleibt. Er darf keinen Biegungen in sich unterworfen sein, d. h. Kollimator, Prismen und Kamera dürfen keinerlei Bewegungen gegeneinander ausführen, in welcher Lage auch immer der Apparat gebraucht wird und wie sich auch seine Lage während der meist sehr lange dauernden Aufnahme ändert.

Diese Bedingung hat man von Anfang an zu erfüllen gestrebt, sie ist z. B. bei der Konstruktion des VOGELschen Spektrographen, mit dem die ersten brauchbaren Radialgeschwindigkeiten von Sternen erhalten wurden, in weitgehendem Maße berücksichtigt worden, und bei den Spektrographen der neuesten Zeit ist sie wohl stets in voller Strenge erfüllt. Es wird später bei der Beschreibung einzelner Apparate besprochen werden, auf welche Weise diese erforderliche hohe mechanische Stabilität gewonnen wird.

Der Spektrograph muß aber nicht nur in sich selbst stabil sein, er muß auch so fest mit dem Fernrohr verbunden sein, daß die optischen Achsen des Fernrohrs und des Kollimators eine unveränderliche Lage gegeneinander behalten,

¹ Man vgl. hierzu J. E. KEELER, *Elementary Principles Governing the Efficiency of Spectroscopes for Astronomical Purposes*, Sid. Messenger 10, S. 433 (1891), H. F. NEWALL, *On the General Design of Spectrographs to be attached to Equatorials of Large Aperture, considered chiefly from the Point of View of Tremor-Discs*, M. N. 65, S. 608 (1905), J. S. FLASKERT, *Report of the Chief Astronomer 1909*, Appendix 2, S. 153, Ottawa 1910, F. L. O. WADSWORTH, *General Considerations respecting the Design of Astronomical Spectroscopes*, Ap. J. 1, S. 52 (1895).

welche Lage auch immer das Fernrohr einnimmt Auch diese Frage wird bei der Beschreibung einzelner Apparate behandelt werden

2 Thermische Stabilität des Spektrographen Verschiebungen der einzelnen Teile des Spektrographen gegeneinander können auch dann entstehen, wenn der Apparat bei sich verändernden Temperaturen gebraucht wird Da der Spektrograph nicht wie im Laboratorium in einem Raume konstanter Temperatur verwendet wird, sondern in offenen Räumen, z B Kuppeln, deren Temperatur durch die nächtliche Abkühlung oder durch Winde mehr oder minder sinkt, lassen sich solche inneren Bewegungen infolge der thermischen Ausdehnung der zum Bau verwendeten Materialien nicht vermeiden Aber das ist nicht die einzige Einwirkung von Temperaturänderungen Während nämlich die zum Aufbau verwendeten metallischen Teile sich verhältnismäßig schnell und gleichmäßig auf die im Beobachtungsraum herrschende Temperatur einstellen und dann, falls diese konstant bleibt, sich nicht mehr ändern, passen sich die optischen Teile, besonders die Prismen mit ihren großen Glasmassen, nur langsam der herrschenden Temperatur an Sie können, auch wenn sie sich schon einige Zeit in konstanter Temperatur befinden, noch weit von dem inneren thermischen Gleichgewicht entfernt sein Die Folge davon ist, daß die optische Abbildung nicht fehlerfrei ist und sich, wenigstens während längerer Expositionszeiten, ändert Sternaufnahmen wie Laboratoriumsversuche haben gezeigt, daß die thermischen Störungen der Abbildung Beträge annehmen, die so groß sind, daß die gewünschte Genauigkeit der Messungen nicht erreicht werden kann, welche bei Aufstellung des Instrumentes in einem Raum dauernd konstanter Temperatur leicht erhalten wird

Die zweite Bedingung, die für einen Sternspektrographen realisiert sein muß, ist mithin, daß man den ganzen Apparat in eine Hülle einschließt, durch welche der Apparat während vieler Stunden auf gleichbleibender Temperatur gehalten werden kann Anfanglich glaubte man die Temperaturkonstanz dadurch erreichen zu können, daß man den Apparat mit wärmeisolierenden Materialien (Wolldecken, Federkissen usw.) umgab, wie z B bei dem ersten MILLS-Spektrographen des Lick-Observatoriums, aber es zeigte sich bald, daß diese Art des Schutzes namentlich bei längeren Belichtungen nicht genügt Man ging dazu über, den ganzen Apparat in einen elektrisch geheizten Kasten einzuschließen, dessen Innentemperatur für beliebig lange Zeit automatisch konstant gehalten wird Die Beschreibung einer solchen Heizvorrichtung wird später gegeben werden

3 Die Optik des Spektrographen Für einen Sternspektrographen ist endlich noch eine dritte Bedingung zu erfüllen er muß das ganze Licht eines Sternes, welches mittels des Fernrohrobjektives auf den Spalt konzentriert wird, aufnehmen Das Öffnungsverhältnis des Kollimators muß gleich oder größer als das des Fernrohrobjektives sein Der Kollimator muß also in seinen Dimensionen dem vorhandenen Fernrohr angepaßt werden, wenn der Spektrograph die Leistung des Fernrohrs ganz ausnutzen soll

Die Erfüllung dieser Bedingung ist für die Leistungsfähigkeit des Spektrographen von besonderer Bedeutung, da die kosmischen Lichtquellen mit Ausnahme einiger wenigen Objekte an sich eine so geringe Intensität besitzen, daß von ihr nichts durch eine unrichtige Dimensionierung der Spektrographen verloren werden darf Im Laboratorium hat man es auch häufig mit schwachen Lichtquellen zu tun, kann aber stets ohne große Kosten die Linse, die zur Projektion dient, so wählen, daß das Kollimatorobjektiv voll ausgefüllt ist, außerdem können die Belichtungszeiten meist beliebig verlängert werden Für Laboratoriumszwecke bestimmt der vorhandene Spektrograph die Dimensionen der

Projektionslinse, dagegen ist bei der Aufnahme von Sternspektren das vorhandene Fernrohr maßgebend für den Spektrographen

Sind Öffnung und Brennweite des Kollimators bestimmt, so ergeben sich ohne weiteres die Größe der Prismen sowie die Öffnung der Kameralinse sowohl für einen Laboratoriums- wie auch für einen Sternspektrographen. Die Kameralinse soll innerhalb des gewünschten Wellenlangenbezuges die gesamten aus den Prismen austretenden Strahlenbündel aufnehmen und zu einem Bilde des Spektrums vereinigen, sie muß also eine Öffnung besitzen, die der austretenden Strahlenbündel gleich ist, und sie muß eine solche Konstruktion haben, daß sie den ganzen gewünschten Wellenlangenbezirk scharf auf der photographischen Platte abbildet. Die Größe ihrer Brennweite richtet sich nach der Aufgabe, die zu lösen ist. Soll eine große lineare Ausdehnung des Spektrums (lineare Dispersion) erhalten werden, so ist die Brennweite groß, etwa gleich der des Kollimatorobjektives zu wählen. Dieser Fall liegt vor, wenn etwa die Radialgeschwindigkeiten heller Sterne mit großer Genauigkeit gemessen werden sollen. Sind die Sterne schwach, so ist die Brennweite der Kameralinse klein zu wählen, die lineare Ausdehnung des Spektrums wird dann entsprechend

dem Verhältnis $\frac{\text{Brennweite der Kamera}}{\text{Brennweite des Kollimators}}$ kleiner, gleichzeitig wird die Breite des Spektrums in demselben Verhältnis abnehmen, die Lichtstärke des Spektrographen aber umgekehrt dem Quadrat des obigen Verhältnisses zunehmen. Diese Zunahme der Lichtstärke kann man bei der Aufnahme flachenhafter Objekte (Planeten, Nebel) nutzbar machen, nicht aber bei der Aufnahme von Sternen, wenigstens nicht voll entsprechend dem reziproken Quadrat des obigen Verhältnisses. Die Sternspektren sind bei fester Pointierung auf den Stern nahezu fadenförmig. Um die Linien in ihnen erkennen und ausmessen zu können, muß man die fadenförmigen Spektren verbreitern, was meist schon während der Aufnahme dadurch bewirkt wird, daß man das Uhrwerk des Fernrohrs in geeignetem Betrage vor- oder nachgehen läßt. Die geringste, zur Ausmessung eines Sternspektrums noch brauchbare Breite beträgt etwa 0,15 bis 0,20 mm. Besitzt nun die Kamera eine kurze Brennweite, so ist es nötig, um diese Breite zu erhalten, den Stern über eine große Strecke auf dem Spalt laufen zu lassen, als es bei einer Kamera mit längerer Brennweite nötig ist. Der Gewinn an Lichtstärke für Sternaufnahmen bei kurzer Brennweite der Kamera beruht somit nur auf einer Verkleinerung der linearen Dispersion und ist daher in jedem Fall kleiner als bei der Aufnahme flachenhafter Objekte. Immerhin wird eine merkliche Abkürzung der Belichtungszeit erzielt bei der Verwendung einer kurzen Kamera, freilich ist sie mit einer Verringerung der linearen Dispersion und damit einer Abnahme der Meßgenauigkeit erkauft.

Da Spektrogramme, die mit einer Kameralinse von kurzer Brennweite und großem Öffnungsverhältnis aufgenommen werden, meist einen ziemlich großen Wellenlangenbereich umfassen sollen, ist es nötig, für die Kameralinse eine besondere Konstruktion zu wählen. Eine gute Gesichtsfeldebildung muß für den ganzen in Betracht kommenden Wellenlangenbereich durchgeführt sein, außerdem muß die Kameralinse sich in einem ebenso guten Korrektionszustand befinden wie die mit kleinerem Öffnungsverhältnis. Man wird daher meistens auf Spezialkonstruktionen, z. B. auf nicht-sphärische Systeme, zurückgreifen müssen¹.

¹ Man vgl. hierzu J. HARTMANN, Über ein neues Kameraobjektiv für Spektrographen Z. f. Instr. 24, S. 257 (1904), J. WILSING, Über die Bildebnung bei Spektrographenobjektiven Kibenda 26, S. 101 (1906), K. SCHWARZSCHILD, Über Spektrographenobjektive Sitzber. d. Preuß. Akad. Math. Phys. Kl. 1912 S. 1220, J. S. PLASKETT, Report of the Chief Astronomer 1909 Appendix 2, S. 170 Ottawa 1910.

Auf die Spektrographenobjektive wird in Ziff 11 noch einmal näher eingegangen

4 Das Fernrohr¹ Im vorhergehenden ist der Fall behandelt worden, daß für ein bereits vorhandenes Fernrohr ein zu ihm passender Spektrograph konstruiert werden soll. Man kann aber fragen, wie muß das Fernrohr beschaffen sein, damit ein mit ihm verbundener, richtig angepaßter Spektrograph es ermöglicht, Spektren lichtschwacher Objekte aufzunehmen.

Bei der Erörterung der Verhältnisse sind zwei Fälle zu unterscheiden, je nachdem es sich um flächenhafte Objekte (Planeten, Nebel usw.) oder um Steine, d. h. nahezu punktförmige Objekte, handelt.

α) Es werde zunächst der erste Fall behandelt, und es sei vorausgesetzt, daß die bereits oben aufgestellte Bedingung gleiches Öffnungsverhältnis für Fernrohr und Kollimator, erfüllt sei, d. h. alles vom Fernrohrobjektiv aufgefangene Licht soll auch vom Kollimator aufgenommen werden. Die Flächenhelligkeit des Bildes, welches vom Objektiv auf dem Spalt erzeugt wird, ist proportional dem Quadrate des Öffnungsverhältnisses des Fernrohrobjektives. Man könnte nun annehmen, daß ein Fernrohr kurzer Brennweite für die Aufnahme des Spektrums eines flächenhaften Objektes günstiger ist als ein Objektiv gleicher Öffnung, aber langer Brennweite, da das auf dem Spalt erzeugte Bild der Fläche im ersten Fall heller ist als im zweiten. Es läßt sich aber leicht zeigen, daß dieser Schluß irrig ist, die Helligkeit des Spektrums eines flächenhaften Objektes ist unabhängig von der Winkelöffnung des Fernrohrs, sie ist vielmehr bestimmt durch die Öffnung des Kollimators. Es seien O, F, S Öffnung, Brennweite und Flächeninhalt des Fernrohrobjektives, o, f, s die entsprechenden Größen der Kollimatorlinse, ferner sei, wie bereits erwähnt, die Bedingung $\frac{O}{F} = \frac{o}{f}$ erfüllt. Das aufzunehmende Objekt sei eine kleine gleichmäßig erleuchtete Fläche, die Einheit der Lichtmenge sei die Menge, welche auf eine Fläche fällt, die gleich der Fläche s des Kollimatorobjektives ist. Dann ist die Lichtmenge S , welche auf das Fernrohrobjektiv fällt

$$\frac{S}{s} = \left(\frac{O}{o}\right)^2 = \left(\frac{F}{f}\right)^2$$

Alles dieses Licht fällt auf die Kollimatorlinse und findet sich daher im virtuellen Bild, welches von dieser Linse in unendlicher Entfernung erzeugt wird. Die Winkelgröße dieses virtuellen Bildes ist gleich $F//$ mal, die Winkelfläche (angulare Fläche) aber $(F//)^2$ mal der des Objektes. Es ist somit $(F//)^2$ mal soviel Licht verteilt auf eine $(F//)^2$ mal so große Fläche, d. h. die Helligkeit des virtuellen Bildes ist die gleiche wie die des Objektes. Die Helligkeit des virtuellen Bildes bestimmt nun die Helligkeit des Spektrums, folglich ist die Helligkeit des Spektrums eines entfernten flächenhaften Objektes unabhängig von der Winkelöffnung (Öffnungsverhältnis) des Fernrohrobjektives, d. h. ein Fernrohrobjektiv mit großer Brennweite ist für die Beobachtung des Spektrums eines Flächenbildes ebenso geeignet wie ein Fernrohr derselben Öffnung, aber kurzer Brennweite. Die Lichtstärke ist somit einzig und allein durch die Öffnung des Kollimators bestimmt, und je größer man diese wählt, um so lichtstärker wird der Spektrograph sein.

β) Handelt es sich darum, zu überlegen, wie das Fernrohr gewählt werden muß, damit ein mit ihm verbundener Spektrograph es gestattet, Spektren schwacher und sehr schwacher Sterne aufzunehmen — das ist zur Zeit wohl die wichtigste

¹ J. E. KEELER, Elementary Principles Governing the Efficiency of Spectroscopes for Astronomical Purposes. Sid Messenger 10, S 433 (1891), C. S. HASTINGS, Report of the Eclipse Expedition to Caroline Island May 1883. Wash Nat Ac Mem 2, S 108 (1884).

Aufgabe —, so ist zu berücksichtigen, daß das Bild eines Sternes kein Punkt, sondern ein Scheibchen von bestimmtem Durchmesser ist. Es sei vorausgesetzt, daß das Objektiv bzw. der Spiegel vollkommen fehlerfrei sei, ferner zur Vereinfachung der Betrachtung, daß der Stern monochromatisches Licht aussende. Das von einem Objektiv erzeugte Bild eines Sternes besteht dann bekanntlich aus einem zentralen Beugungsscheibchen, welches von einer Anzahl heller und dunkler Ringe umgeben ist. Die Lichtmenge, die im Brennpunkte des Objektivs im Ringe vom Radius ϱ vorhanden ist, beträgt dann [Handb. der Astrophysik Bd II, 2. Hälfte, S. 562, Formel (16)]

$$U(\varrho) = k \frac{\pi}{4} d^2 \left(\frac{z}{2}\right)^2 \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{2}\right)^2 + \frac{5}{36} \left(\frac{z}{2}\right)^4 \mp \right\},$$

wo $z = \frac{\varrho d}{\lambda'}$, $\lambda' = \frac{\lambda}{\pi \sin 1'}$, d der Durchmesser des Objektivs, ϱ der in Bogenminuten gemessene Radius eines unendlich schmalen Beugungsringes, λ die Wellenlänge des Sternlichtes ist und der Faktor k die Verluste durch Absorption und Reflexion darstellt¹. Für die vorliegende Betrachtung genügt es, sich auf das zentrale Beugungsscheibchen zu beschränken, das 84% des gesamten Sternlichtes enthält. Der Wert der Hilfsvariablen z für dieses Scheibchen ($z = 3,83$) folgt aus der Beugungstheorie. Nach der obigen Formel ist die Lichtmenge in diesem zentralen Scheibchen allein durch die Größe der Oberfläche des Objektivs $\left(\frac{\pi}{4} d^2\right)$ bestimmt, d. h. für Aufnahmen schwacher Sterne ist ein Objektiv großer Öffnung nötig. Über die Brennweite, welche diesem Objektiv zu geben ist, sagt die Theorie nichts aus, die Lichtmenge im zentralen Beugungsscheibchen ist unabhängig von der Brennweite. Sie ist daher nur vom Gesichtspunkte der Praxis aus zu wählen.

Man geht zweckmäßigerweise wieder von der Größe der Prismen und der Öffnung des Kameraobjektivs aus. Letzteres muß bei großer Öffnung eine kurze Brennweite besitzen. Im Gegensatz hierzu muß die Brennweite des Kollimatorobjektivs im Verhältnis zu der des Kameraobjektivs groß gewählt werden, damit eine möglichst große Lichtkonzentration im Spektrogramm erzielt werden kann. Aber auch noch ein anderer Grund spricht für einen langen Kollimator. Der Durchmesser des vom Fernrohrobjektiv erzeugten Sternbildchens ist infolge der mehr oder minder vorhandenen Luftunruhe stets wesentlich größer als der des zentralen Sternscheibchens nach der Beugungstheorie. Beispielsweise fand NEWALL² in Cambridge für Nächte mit mittelgutem Luftzustand für den Durchmesser des Sternbildchens 5'', für weniger guten, sehr häufigen Luftzustand aber 8'' bis 10'', und seine Angaben stimmen durchaus mit langjährigen Erfahrungen anderer Observatorien, z. B. von Potsdam³. Um nun solche Nächte für die Aufnahme von Sternspektren verwenden zu können, ist der Spalt des Spektrographen entsprechend weit zu öffnen⁴. Das bedingt aber eine Vergrößerung der Brennweite des Kollimatorobjektivs, da sonst die Rein-

¹ Eine Ableitung dieser Formel findet sich in MASCART, *Traité d'optique* Bd I, S. 312 (1889), K. STREHL, *Theorie des Fernrohrs*, S. 89 (1894), G. MÜLLER, *Photometrie der Gestirne*, S. 165 (1897). Letztere Ableitung enthält übrigens einen Rechenfehler.

² M. N. 56, S. 108 (1896).

³ J. S. PLASKETT gibt auf Grund sehr eingehender spezieller Studien an, daß in Ottawa der Bilddurchmesser eines Sternes nur in sehr seltenen Fällen 2'', im allgemeinen aber beträchtlich größer ist, während er theoretisch 0'',57 für den 15 inch-Refraktor sein sollte (Report of the Chief Astronomer, S. 156 Ottawa 1910).

⁴ W. W. CAMPBELL [Ap J 8, S. 124 (1898)] betont besonders, daß er aus diesem Grunde den Kollimator für den MILLS-Spektrographen so lang gemacht hat, als es die Größe der Prismen erlaubte.

heit des Spektrums zu gering wurde. Betrachtet man nämlich die Formel von SCHUSTER $P = \frac{\lambda}{\lambda + d\psi} R$ (d = Spaltweite, $\psi = \frac{o}{f}$, R = auflösende Kraft) für die Reinheit P des Spektrums als gültig, so ist $\frac{o}{f} = \psi$ möglichst klein zu wählen.

Mit der Brennweite und Öffnung des Kollimatorobjektives ist bei gegebenem Durchmesser des Fernrohrobjektives auch seine Brennweite eindeutig bestimmt, da auch hier die Bedingung gilt

$$\frac{\text{Öffnung des Fernrohrobjektives}}{\text{Brennweite des Fernrohrobjektives}} = \frac{\text{Öffnung des Kollimatorobjektives}}{\text{Brennweite des Kollimatorobjektives}}$$

Es folgt also aus diesen Erwägungen, das eine große Brennweite des Fernrohrobjektives für die Aufnahme der Spektre lichtschwacher Sterne vorteilhaft ist, und in der Tat haben gerade die Fernrohre, mit denen die meisten Sternspektren aufgenommen worden sind, z. B. die Refraktoren des Lick- und des Yerkes-Observatoriums, die Spiegel des Mount Wilson- und des Victoria-Observatoriums nicht nur große Öffnungen, sondern auch große Brennweiten.

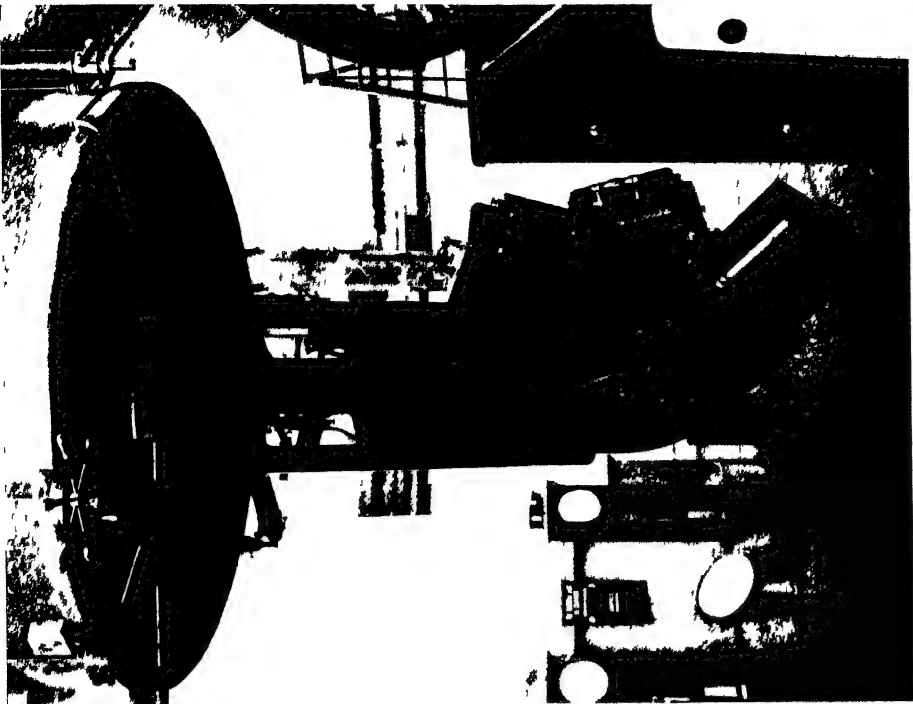
Die Erörterungen der Ziff 4 stellen praktische Erwägungen dar, wie sie der Astrophysiker bei der Konstruktion seiner Spektrographen anzustellen pflegt. Obwohl sie sich immer bewahrt haben, bedeuten sie keineswegs eine wirkliche Lösung der Aufgabe. Diese mußte wohl auf beugungstheoretischer Grundlage behandelt werden, etwa in der Weise, wie A. SCHUSTER¹ bei seinen Untersuchungen über die Theorie der Spektroskope verfahren ist. Diese bezieht sich auf Spektroskope, mit denen Emissionsspektren beobachtet werden sollen und läßt sich, wie SCHUSTER² ausführt, nicht ohne weiteres übertragen auf Apparate, mit denen Absorptionsspektren, wie die der Sonne und der Sterne, aufgenommen werden sollen. Eine strenge Behandlung dieses Falles steht bisher noch aus, wäre aber sehr erwünscht. Inzwischen hat man die SCHUSTERsche Formel wenigstens als eine Annäherung für solche Rechnungen benutzt.

5 Das Teleskop und der Spektrograph des Astrophysikalischen Observatoriums in Victoria, B.C. Ein schönes Beispiel zu den in der vorhergehenden Ziffer gegebenen Überlegungen bietet die Konstruktion des Spektrographen und des großen Teleskopes in Victoria. J. S. PLASKETT³ ließ sich nämlich von ganz ähnlichen Gedankengängen, wie es die obigen sind, bei der Ausarbeitung des Planes für diese Instrumente leiten. Er sagt (S 81) von dem Spektrographen „the telescope may more properly be called an accessory of the spectrograph.“ Das Teleskop, das in der Hauptsache zu Radialgeschwindigkeitsmessungen und spektrographischen Arbeiten verwendet werden sollte, mußte natürlich eine möglichst große Öffnung bekommen, damit die Spektre schwacher Sterne aufgenommen werden können. Aus technischen und finanziellen Gründen kam daher nur ein Spiegel in Betracht, um so mehr, als ein solcher gerade für spektrographische Arbeiten wesentliche Vorzüge vor einem Objektiv hat. Der Kollimator sollte eine große Brennweite erhalten, da PLASKETT den Vorteil, den eine solche besitzt, während seiner früheren Tätigkeit auf diesem Gebiete in Ottawa erkannt hatte. Die Beschaffung großer, optisch einwandfreier Prismen war damals ziemlich schwierig. Da ADAMS sehr gute Prismen mit 63 mm wirk-

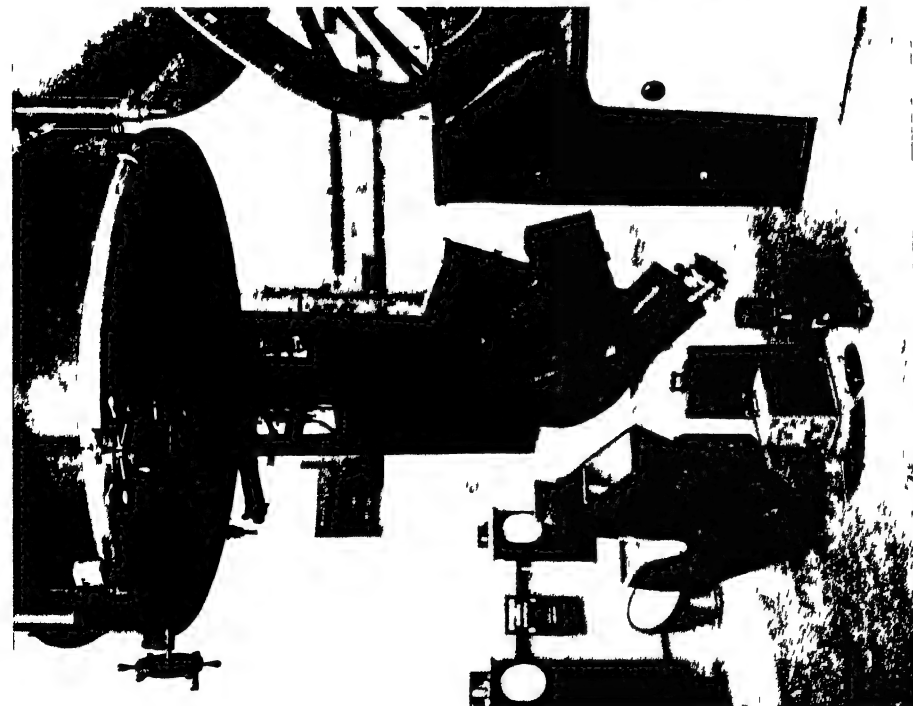
¹ Introduction to the Theory of Optics, S. 140ff. 1904, The Optics of the Spectroscope Ap J 21, S. 196ff. (1905)

² L. c. S. 148. The above treatment of the subject is based on the consideration of spectra of bright lines, and cannot without modification be applied to the absorption phenomena exhibited in the spectra of sun and stars.

³ Description of Building and Equipment. Publ. Dom. Astrophys. Obs. Victoria, B. C., 1, S. 7 [1922].



b



a

Abb 1a u b Der Spektrograph des Astrophysikalischen Observatoriums in Victoria, B C

samer Öffnung erworben hatte, beschränkte sich PLASKETT auch auf diese Größe, wodurch die Öffnung des Kollimatorobjektives festgelegt war. Es handelte sich nun noch um die Wahl der Brennweiten des Spiegels und des Kollimators. Die Länge des Teleskopes durfte, wiederum aus technischen und finanziellen Gründen, nicht zu groß werden, das Öffnungsverhältnis dagegen mußte, um einen langen Kollimator verwenden zu können, klein werden. Beide Bedingungen ließen sich gleichzeitig dadurch erfüllen, daß das Teleskop als CASSEGRAIN-System ausgebaut wurde, was auch für die Anbringung der Spektrographen am Teleskop vorteilhaft war. PLASKETT wählte das auch sonst für Teleskope häufig angewendete Öffnungsverhältnis 1:18. Es kam somit folgendes Instrument zustande:

Teleskop Öffnung 1,8 m, Äquivalentbrennweite 33 m

Spektrograph Kollimator (Brashear-Triplet, mit Uhrenöl verkittet), Öffnung 63 mm, Brennweite 1143 mm. Drei Prismen mit brechendem Winkel von 63° aus dem Glas Jena O 118, Seitenlänge 123 mm, 129 mm, 135 mm, Basis 128 mm, 135 mm, 141 mm. Kameraobjektive mit 76 mm Öffnung und Brennweiten von 381 mm, 711 mm, 940 mm.

Diese Konstruktion hat sich in jeder Beziehung bewährt, die Leistungen des Instrumentes sind ganz ausgezeichnet. Es gehört nicht nur zu den größten, sondern auch zu den besten überhaupt vorhandenen Teleskopen, und das gleiche gilt auch für den Spektrographen (Abb. 1).

b) Der mechanische Aufbau des Spektrographen

6 Einleitung In Ziff. 1 war darauf hingewiesen worden, daß ein Spektrograph, der mit einem Fernrohr verbunden wird, welches in verschiedenen Lagen gegen den Horizont gebraucht wird, eine ganz besonders gute mechanische Stabilität besitzen muß. Der Spektrograph soll bei allen Bewegungen des Fernrohrs in sich fest und unveränderlich bleiben, damit sich seine einzelnen Teile nicht gegeneinander verschieben können. Er muß weiterhin so gebaut und an das Fernrohr angebracht sein, daß die optische Achse des Kollimators eine Verlängerung der optischen Achse des Fernrohrs bildet und auch bei Bewegung des letzteren bleibt. Diese Bedingung wird wohl stets schon vom Mechaniker bei dem Bau des Spektrographen erfüllt. Eine Prüfung läßt sich übrigens leicht ausführen. VOGEL [Publ. Astrophys. Abs. 7, Teil 1, S. 13 (1892)] verfährt folgendermaßen: Das Objektiv des Fernrohrs wird stark abgeblendet und auf das Objektiv des Kollimators ein Ring aufgesetzt, welcher eine matte Glasscheibe trägt, in die konzentrische Ringe eingearbeitet sind. Der Spalt wird auf einige Zehntel Millimeter geöffnet und seine Höhe so verkleinert, daß an Stelle des Spaltes eine kleine quadratische Öffnung genau in der optischen Achse des Kollimators entsteht. Nun wird das Fernrohr auf den Mittelpunkt der Sonnenscheibe gerichtet, und es entsteht dann auf der Mattscheibe hinter dem Kollimatorobjektiv ein runder heller Fleck, der genau in der Mitte der Mattscheibe liegen muß, wenn die Achsen des Fernrohrs und des Kollimators zusammenfallen. Andernfalls ist die Lage des Spektrographen mit Hilfe der Schrauben, die zur Anbringung des Spektrographen am Fernrohr dienen, so lange zu ändern, bis der helle Fleck in die Mitte der Mattscheibe kommt.

Auf dem Lick-Observatorium wurde ganz ähnlich verfahren [Lick Publ. 16, S. XXVf. (1928)].

Es ist ganz natürlich, daß man sich beim Bau der ersten Spektrographen durch die Konstruktion der früher benutzten Astrospektroskope leiten ließ, deren mechanische Ausführung schon recht gut war. Und so kam es, daß selbst

die ersten Spektrographen, z B der von VOGEL für das Potsdamer Observatorium gebaute, bereits eine hohe, wohl genügende Stabilität besaßen. Das gilt wenigstens für die meisten Spektrographen mit mehreren Prismen, die einen viel gedrungeneren Aufbau zuließen, als die mit nur einem Prisma. Trotzdem hat man auch später, als sich die Form der Spektrographen mehr oder minder änderte, niemals außer acht gelassen, eine möglichst hohe Festigkeit anzustreben. Es mag z B auf den BRUCE-Spektrographen von E B FROST¹ und auf den Spektrographen V des Potsdamer Observatoriums² hingewiesen werden. Letzterer ergab eine

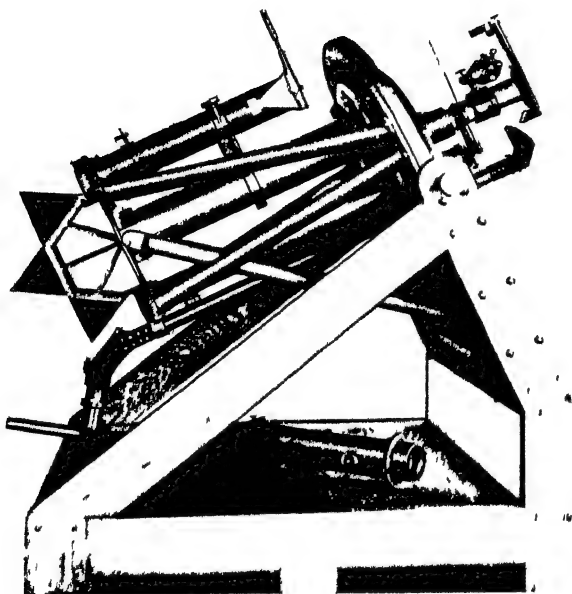


Abb 2 Der BRUCE-Spektrograph des Yerkes-Observatoriums

maximale Biegung von 0,0030 mm, ein Betrag, der sehr nahe gleich der maximalen Biegung des weiter unten beschriebenen zweiten MILLS-Spektrographen (0,0025 mm) ist.

Es mag hier gleich noch erwähnt werden, daß diese älteren Apparate mit Hilfe eines Tellers oder Flansches (s die Abb 2, 3, 4) an das Fernrohr angeschraubt und so mit ihm fest verbunden wurden.

7 Konstruktion von W. H. WRIGHT Eine von allen früheren Apparaten abweichende Konstruktion, die einen hohen Grad von Biegungsfreiheit aufweist, hat W H WRIGHT angegeben. WRIGHT betrachtet den Spektrographen als aus zwei voneinander ganz unabhängigen selbständigen Teilen bestehend, nämlich 1 der eigentliche Spektrograph, dieser soll ein in sich möglichst festes, sich nicht in sich biegendes Gebilde sein, 2 die Vorrichtung zur Verbindung dieses ersten Teiles mit dem Fernrohr. Sie soll gleichfalls möglichst geringe Biegung aufweisen und den Spektrographen so halten, daß sich die doch immer noch verbleibende Biegung nicht auf die einzelnen Teile des Spektrographen übertragen und eine Biegung in ihm selbst erzeugen kann. Der Fehler, der in der Biegung der Tragevorrichtung seinen Ursprung hat, besteht darin, daß die

¹ Ap J 15, S 1 (1902)

² Z f Instik 30, S 29 (1910)

Achsen von Fernrohr und Kollimator nicht ganz zusammenfallen, daß also in der Hauptsache nur ein kleiner Lichtverlust eintritt, während eine Biegung im Spektrographen selbst Fehler in den Werten der Radialgeschwindigkeit hervorruft und daher sich bei weitem schädlicher auswirkt als der erste Fehler. Da sich WRIGHTS Konstruktion ausgezeichnet bewährt hat und seitdem fast ausschließlich verwendet wird, sei sie mit des Verfassers eigenen Worten hier wiedergegeben¹

"Heretofore most spectrographs have been fastened to the telescope somewhere near the slit end, and have projected outward from their supports, a form of

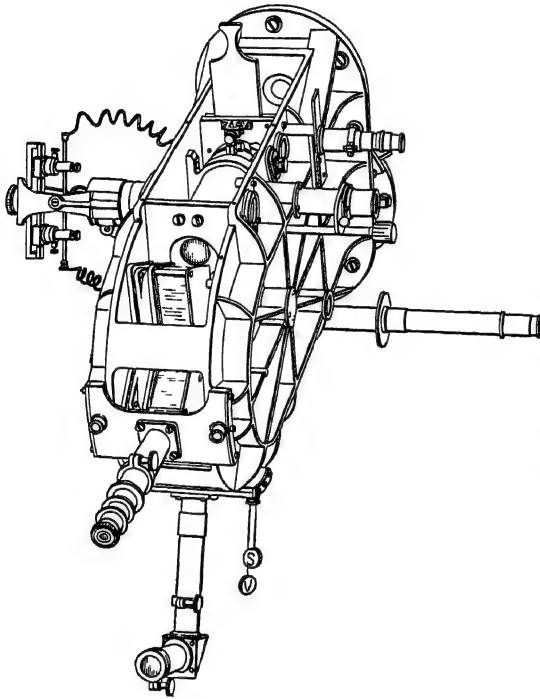


Abb 3

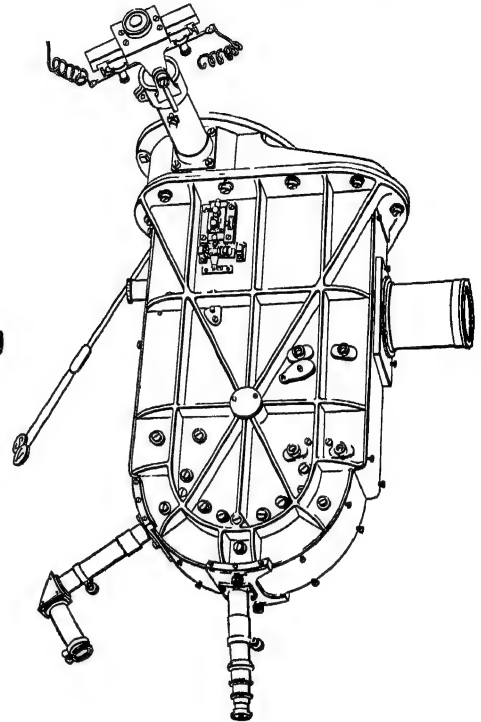


Abb 4

Abb 3 u 4 Spektrograph V des Potsdamer Observatoriums

mounting hardly calculated to give a minimum of flexure. As an engineering analogy, we may consider the case of a projecting beam, one end of which is securely fastened in a wall, as indicated in Fig 8 (Abb 5). Let l represent the maximum linear displacement due to the bending of the beam under its own weight, and α the maximum angular deflection. By resting the beam on two supports s_1 and s_2 , one under each end, the corresponding quantities are reduced to

$$l' = \frac{5}{48} l, \quad \alpha' = \frac{1}{2} \alpha$$

By bringing s_1 and s_2 closer together the flexure can be still further reduced, there being a value

$$s_1 = s_2 g = \frac{l}{2} \left(1 - \frac{1}{3} \sqrt{3} \right) = 0,211 l,$$

¹ Publ Lick Obs 9, S 50f (1907)

for which α'' vanishes and $\Delta'' = \Delta_0$. Under such circumstances the relative positions of two pieces of apparatus, one at f and the other at g , would be unaffected by flexure, or what amounts to the same thing, by the position of the beam with reference to the vertical

In designing the spectrograph an attempt was made to take advantage of the class of phenomena here exemplified by furnishing the spectrograph with a support near each end. The instrument is shown in Fig 9 (Abb 6). It consists of a ribbed steel casting which, for want of a better name, we shall refer to as the main frame, to which are attached by screws the slit mechanism, the prism box, and the camera tube. Each one of the latter three parts is independent of the other two. The light passes from the slit to the collimator lens through a hole bored lengthwise through the main frame. Near the upper end of this frame, and forming a part of it, is a circular disk at right angles to, and centered on, the axis of collimation. This disk, the edges of which are turned to a spherical surface, fits into a cylindrical brass ring shown in the photograph. The ring forms the forward, or upper, support of the spectroscope, and allows a motion of the instrument along, or rotation around, the line of collimation. The other support consists of a rod swiveled in the main frame close to the prism box.

This rod has a free swing through a sufficient angle, in a plane which stands at right angles to the prism box and parallel to the axis of collimation. These supports are themselves held in the framework or cradle of angle irons shown

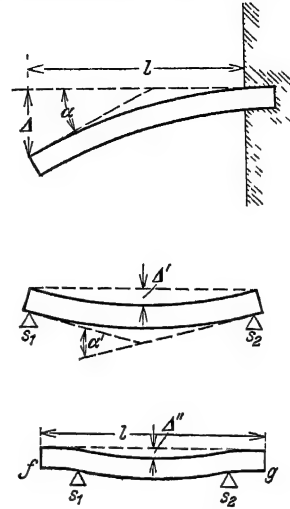


Abb 5 Biegung eines Stabes

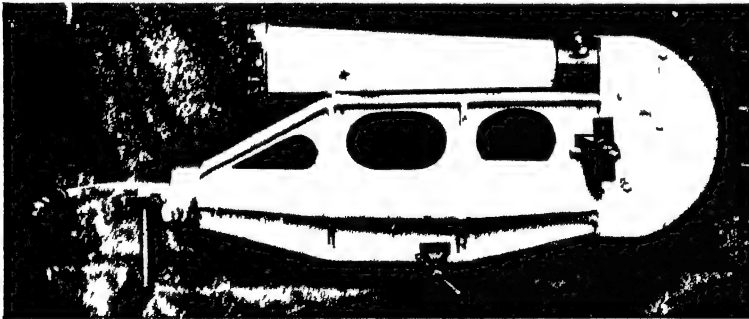


Abb 6 Zweiter MIRRIS-Spektrograph des Lick-Observatoriums

in Figs 9 and 10 (Abb 7 u 8). The ends of the upper rod are fastened securely to the channel iron cross-pieces, while those of the lower rest in slides, which, by means of hand screws shown in the figures, may be moved in a direction parallel to the axis of collimation. By means of these screws, through the motion of the whole instrument, the slit is adjusted to the focus of the telescope.

The prism box is made up of sheet steel reinforced inside by webs. The prisms rest on buttons of hard rubber, which are screwed to one side of the box. These buttons serve as good heat insulators between the glass and metal. The prisms are held in place by hard rubber stops also fastened to the side of the prism box.

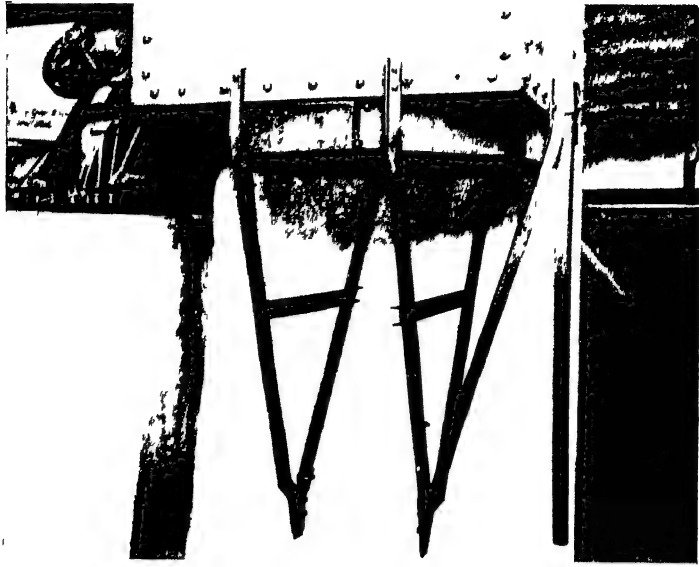


Abb 7 Das den Spektrographen tragende Gestell

These stops have to be adjusted with some care to insure freedom from strain in the prisms. The latter are set in their computed places, which are marked on the side of the box, and are not otherwise adjusted for minimum deviation. Flat springs rest against the tops of the prisms, and on these a light pressure is exerted by screws through the opposite side of the box.



Abb 8 Der Spektrograph im Gestell

The camera is focussed by racking the objective along the axis of collimation. The lens is mounted near the middle of a brass cylinder which moves longitudinally in a sleeve. While there may be no good reason for condemning the use of a moving camera objective, our preference, based on experience with both systems, is for a stationary cell as being less liable to strain the lens.

The alignment of the spectroscope in collimation is effected in one direction by means of nuts which secure the ends of the supporting

rods in the angle iron framework, and in the other through slotted holes for the screws which hold the two channel irons carrying the upper supporting rod to the rest of the framework.

It will be seen that this system of mounting, while providing supports for the spectrograph at two points, precludes all possibility of any strain being transmitted from the supporting system to the instrument."

8 Konstruktion des Einprismenspektrographen von J S PLASKETT

Wesentlich schwieriger ist es, dem Einprismenspektrographen einen einwandfreien mechanischen Aufbau zu geben infolge der weniger gedungenen Form, welche er im Vergleich zum Dreiprismenapparat besitzt. Obwohl auch hier schon manche ältere Apparate sich als durchaus genügend biegungsfrei erwiesen haben, hat man in neuerer Zeit fast allgemein die von W H WRIGHT angegebenen Konstruktionsprinzipien auch für Einprismenspektrographen angewendet. FRANK SCHLESINGER¹ (MELLON-Spektrograph), R H CURTISS (Detroit)², J S PLASKETT (Ottawa)³ schlossen sich beispielsweise beim Bau ihrer Einprismenspektrographen eng an die Prinzipien WRIGHTS an. Es mag hier die durch gute Abbildungen illustrierte Beschreibung von J S PLASKETT gleichfalls im Wortlaut abgedruckt werden.

„The Mechanical Parts — As outlined above the instrument consists essentially of two parts—1 A rigid, hollow, triangular shaped, steel box containing at the obtuse angle the prism, and at the two acute angles the slit and plate and comprising the spectrograph proper, 2 the T iron frame or cradle attached to the end plate of the telescope, in which the spectrograph proper is flexibly supported, and which serves to keep it collimated without flexure of this support producing any stresses in the box itself.

The Spectrograph Box. The box consists of two triangular shaped plates made of hard saw steel about 1,7 mm thick forming the sides, while the edges consist of plates of the same material and thickness, 79,4 mm ($3\frac{1}{2}$ inches) wide. In addition to the edges there are a number of internal braces and supports of the same material, well shown in Fig 4 (Abb 9), which gives a good idea of the construction of the box. These braces as well as the edges of the box have pieces of small angle iron securely riveted along both edges, to which the side plates are firmly screwed. These angle irons are not shown in the figure, as the frame was first put together, the angles then riveted on and finally the plates screwed to these angles and to the internal castings, the heads of the screws being shown on the side of the box in Fig 2 (Abb 10). It was constructed in this manner to prevent as far as possible any internal stresses in the frame of the box. In addition there are iron castings *A, B, C, D, E, F*, Fig 4 (Abb 9), planed to exactly the same width as the edges and braces. *A*, may be called the main casting, having a hole bored through the centre through which the principal supporting shaft passes. The two legs projecting from the triangular part are bored out to fit the collimator and camera tubes. The casting, *D*, is also bored out for the collimator tube and forms the end plate of the box, while the casting *F*, is bored out to carry the upper end of the camera tube. *C*, and *E*, have clearance around them and do not touch the collimator tube, the upper support being attached to the centre of *C*. The part, *B*, has the third supporting shaft screwed into the centre of each side, and also forms the connection between the box proper and the camera end. The latter is made separate, so that camera objectives of different focal lengths may be used if desired.

¹ Publ Allegheny Obs 2, Nr 1 (1910)

² Publ Obs Michigan I, S 431 (1912)

³ Report of the Chief Astronomer 1909, S 161ff. Ottawa 1910

The prism is mounted in a separate cast-iron cell, but is prevented from touching the metal at any point by facings of hard rubber about 3 mm thick, and is kept in its adjusted position by hard rubber stops. It is held firmly in this position in the cell by gentle pressure produced by three small clamp screws passing through the top of the cell and bearing upon one of the facings of hard

rubber 3 mm thick, above mentioned, resting on top of the prism. The base of the cell is surfaced flat, and rests in its compartment on one of the side plates, to which it is rigidly attached by five screws passing through slotted holes to permit of adjustment for minimum deviation.

Collimator and camera tubes are provided with racks and pinions for adjustment, their position being read on millimetric scales, the one attached to the camera being provided with a vernier, reading to tenths of a millimetre. The collimator tube is provided with two clamp screws, one at the top and one at the bottom bearing, while the camera tube has a single clamp screw at the front end. The pinion and clamp wheels and the scales are well shown in Figs 2 (Abb 10) and 3 (Abb 11). The camera attachment, whose form and construction can be fairly well obtained from Figs 2 and 3, is built in box form of the same material, and is firmly screwed to the casting, B, Fig 4 (Abb 9), it and the spectrograph box thus forming what is to all intents and purposes one continuous piece. Between the sides of the camera box, swivels the plate holder attachment which is quite similar in form to the one used with the other spectrograph. It consists essentially of a semi-cylinder 79.4 mm long, 101.6 mm diameter, pivoted along its axis between the sides of the box to permit a wide range in plate inclination. This cylinder is constructed from a section cut from a piece of 4-inch brass tubing, on the ends of which pieces of heavy brass plate are screwed and soldered, and on the plane of section is fastened the brass camera back provided with screws for clamping the holders firmly in place. The plate holder carrier has solidly constructed

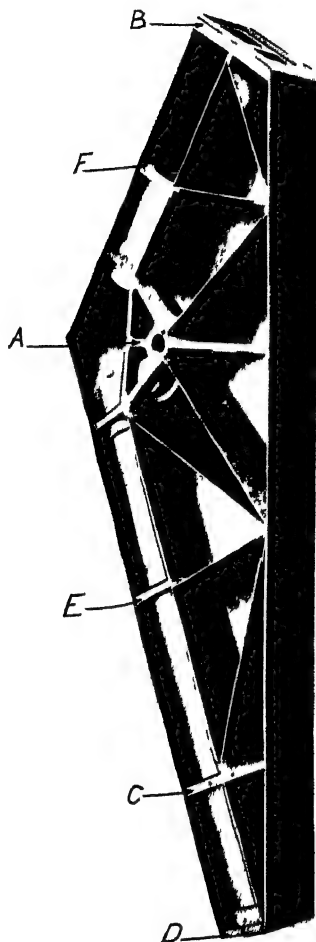


Abb 9 Einprismenspektrograph des Ottawa-Observatoriums

ways permitting lateral movement of about 15 mm, enabling a number of narrow spectra to be made side by side on the same plate if desired. The axis on which the camera back rotates is provided with knurled clamping wheels, while other screws moving in concentric slots enable adjustment and firm clamping to be effected in any desired position, read off on graduations on the cylinder.

As will readily be seen from its design and construction and from the character of the material from which it is made, this spectrograph is exceedingly rigid and the flexure produced by changes of position, however supported, would

be very small. This flexure however, is reduced to a vanishingly small quantity by the new supporting system used in this instrument. The self-contained spectrograph box is, as has been indicated above, supported flexibly on three points in the carrying cradle.

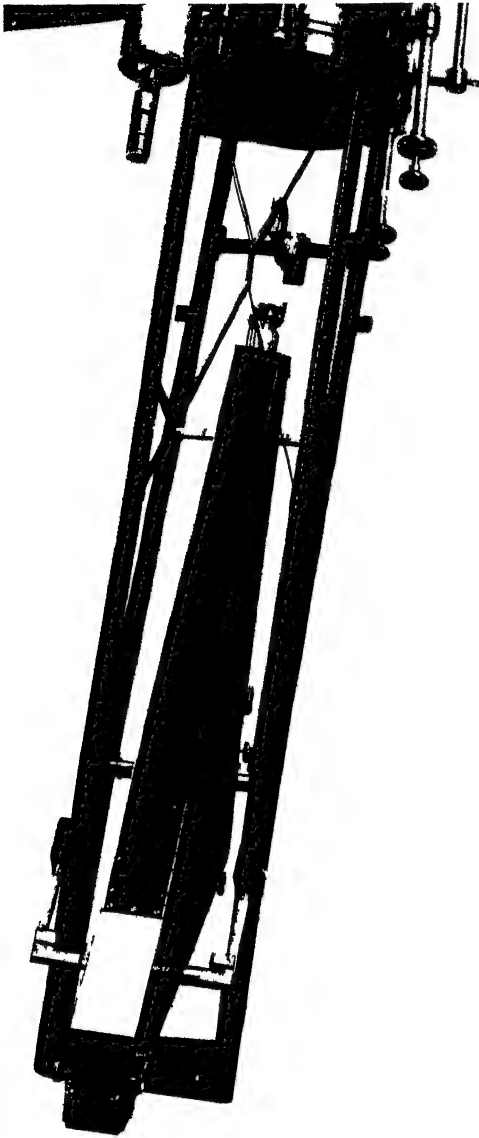
The Supporting Cradle — This truss made of $1\frac{3}{8}$ " T steel is attached at the upper end to a heavy ring casting, which is fastened by the same three swivel bolts used for the other spectrograph to the end plate of the telescope, the mode



Abb 10 Einprismenspektrograph des Ottawa-Observatoriums

of attachment being shown in Fig 3 (Abb 11), which with Fig 4 (Abb 9), well shows the form of the truss. It is evident that the only flexure of this truss in a direction parallel to the sides of the spectrograph will be that due to the extension of one arm and compression of the other in each pair, and this will hence be very slight. Owing to the fact that these two pairs of trusses had to be separated about 20 cm at the lower end to admit the spectrograph with outside temperature case between them, it is evident that flexure in a direction at right angles, parallel to the movement in right ascension, will be greater. This is minimized as much as possible by joining the two ends by a solid webbed casting and by introducing

cross braces at the upper end of the truss as shown. At small hour angles, however, which it is desirable for many reasons to use as far as possible, the component of the weight in this direction will be very small and the flexure



negligible. Even at large hour angles which are sometimes required, the flexure cannot be great. In any case from the method of attaching cradle and box to be presently described, no flexure of the cradle can induce any stresses in the box and the only effect of such flexure will be to slightly alter the axis of collimation of the spectrograph. This can not, however, induce any displacement of the spectral lines, not only on account of its relatively small magnitude but also because it can occur practically only parallel to the spectrum lines and to the refracting edge of the prism, which have no effect on the position of the line.

This principal and central support and connection between cradle and box consists of a shaft 1 inch (25,4 mm) diameter passing through the hole in the main casting. This shaft is left the full size of the hole only for about 2 mm at the centre, so that the box is free to swivel in every direction around the centre to the extent of 2 or 3 degrees. This swivelling motion is, however, limited, by projecting points on the shaft at the ends of the hole, to one parallel to the motion in right ascension and to the slit, rotation around the axis of collimation being prevented. Consequently any flexure of the cradle can not induce any distorting stress in the box.

The upper supporting shaft has a transverse hole in the centre through which a pin

Abb 11 Einprismenspektrograph des Ottawa-Observatoriums

screwed into casting *C* passes, thus allowing longitudinal motion parallel to the axis of collimation as well as swivelling motion in every direction.

The third point of support consists of shafts rigidly screwed into the centre of each side of casting *B*. A second short shaft at each side carried by plates

screwed to the cradle, as shown (Figs 2 [Abb 10] and 3 [Abb. 11]), is placed about 2,5 cm from the first in a direction which, if produced would nearly pass through the centre of mass of the box. A lever attached to these two shafts at each side in such a way as to allow more than sufficient motion without binding, carries a counterbalancing weight, the combined resultant upward thrust of the two on the box being computed to equal the proportional part of the weight that should be carried by this support.

The box is hence carried equally on the three supports without any possibility of distortional stresses occurring in it due to flexure of the cradle, the only effect of such flexure being to slightly change the axis of collimation, which at the utmost can only induce displacements of the second order in the position of the spectral lines."

9 Gitterspektrograph von P W MERRILL und E C NICHOLS Einen mechanisch sehr stabilen, sehr leistungsfähigen Sternspektrographen mit einem Plangitter haben P W MERRILL und E C NICHOLS für das Mt Wilson-Observatorium konstruiert. Da ein solcher Spektrograph nur selten und für ganz spezielle Zwecke (Photographie der roten und ultraroten Teile der Sternspektren) gebraucht wird, soll eine Beschreibung desselben hier nicht gegeben, sondern nur auf die von P W MERRILL hingewiesen werden¹.

10 Anordnung der Beobachtungen zu möglicher Vermeidung der Biegung Eine völlige Vermeidung der Biegung dürfte wegen der Elastizität und der Plastizität der zum Aufbau verwendeten Metalle kaum möglich sein, sie ist aber auch nicht erforderlich, denn es kommt nur darauf an, daß während der Belichtungszeit keine Änderung der Biegung eintritt. Es ist daher auch zweckmäßig, nicht sofort nach der Einstellung des Fernrohrs auf den Stern mit der Spektralaufnahme zu beginnen, sondern erst nach einiger Zeit, damit der Apparat Gelegenheit hat, einen stabilen Zustand und damit innere Ruhe zu erreichen. Bei sehr langen Belichtungen ist die Aufnahme, wenn irgendmöglich, symmetrisch um den Meridian herum zu machen, da in dieser Lage die Änderung der Biegung gering ist. Man ersieht dies aus einer von R H CURTIS aufgestellten Formel², welche die Beziehung zwischen der durch Biegung entstehenden Verlagerung F einer Spektrallinie gegen ihre mittlere Lage in der Richtung der Geschwindigkeitsverschiebung (die Verlagerung ist positiv nach dem roten Ende des Spektrums hin), den Koordinaten δ, t des Sterns und der geographischen Breite φ gibt

$$F = \pm F_m [-\sin \varphi \cos(\delta + \alpha) + \cos \varphi \sin(\delta + \alpha) \cos t],$$

wobei F_m der maximale Wert von F im Meridian ist (+ wenn das Fernrohr östlich vom Meridian liegt und nach einem Punkt nördlich vom Zenit gerichtet ist). Die Achse der Biegung ist die Linie durch den Spalt in der Ebene der Dispersion des Spektrographen. Sie liegt vertikal, wenn $F = 0$ ist. Schließlich ist α der Winkel zwischen dieser Biegungsachse und der Achse des Fernrohrs bzw. des Kollimators. Beträgt die Biegung zur Zeit

$$t_1 \quad F = F_1,$$

$$t_2 \quad F = F_2,$$

so stellt

$$F_2 - F_1 = \pm F_m \cos \varphi \sin(\delta + \alpha) [\cos t_2 - \cos t_1]$$

die Änderung der durch die Biegung erzeugten Linienverschiebung während der Expositionszeit $t_2 - t_1$ dar. Das obere bzw. untere Vorzeichen bezieht sich auf die östliche bzw. westliche Lage des Fernrohrs.

¹ Ap J 74, S 188 (1931) = Mt Wilson Contr Nr 432

² Publ Obs Michigan 1, S 46f (1912). Man vergleiche hierzu auch Publ Allegheny Obs 2, S 5f (1912).

Im großen und ganzen kann gesagt werden, daß man den Einfluß der Biegung auf die Genauigkeit der Beobachtungen ebenso überschätzt hat wie zu anderen Zeiten den Einfluß optischer Mängel oder nicht genügender Temperaturkonstanz. Alle durch diese Einflüsse in die Messungen hineinkommenden Fehler sind bei einigermaßen brauchbaren Apparaten ganz wesentlich geringer als die Fehler, die infolge unrichtiger Einstellung des Sterns auf den Spalt (Einstellfehler) oder mangelhaften Haltens auf dem Spalte während der Belichtung (Haltefehler) entstehen und gleichfalls systematischer Natur sind.

c) Spektrographenobjektive

11 Spektrographenobjektive Die Anforderungen an die Scharfe der Abbildung bei Objektiven für Sternspektrographen sind sehr hohe, da die Genauigkeit der Messungen der Spektren, welche fast stets nur eine geringe lineare Ausdehnung haben, in weit höherem Maße von der guten Abbildung abhängt als bei Spektren sehr großer linearer Ausdehnung, wie es z. B. die von den großen Gitterspektrographen der Laboratorien erzeugten sind. Es ist weiterhin wesentlich, daß ein möglichst großer Wellenlangenbezirk in den aufgenommenen Sternspektren gemessen werden kann, namentlich bei Aufnahmen mit geringer Dispersion.

Die Forderungen, die man an das Kollimatorobjektiv zu stellen hat, sind indessen leicht zu erfüllen. Die Kollimatorlinse soll den in seiner Achse befindlichen Spalt scharf ins Unendliche abbilden und außerdem gut achromatisiert sein. Es genügt daher meist ein Objektiv vom Typus des astronomischen Fernrohrs, welches zur besseren Achromatisierung aber aus drei statt aus nur zwei Linsen zusammengesetzt ist. Sein Öffnungsverhältnis ist klein, da der Kollimator, wenn irgend möglich, eine große Brennweite im Vergleich zu seiner Öffnung haben soll. Entstehen Schwierigkeiten im mechanischen Aufbau eines Spektrographen durch einen sehr langen Kollimator, so kann nach dem Vorgang von P. W. MERRILL¹ statt des astronomischen Objektives ein geeignetes Teleskopobjektiv als Kollimatorlinse verwendet und dadurch ein gedrängter Aufbau des Spektrographen erreicht werden.

Wesentlich höher sind die Ansprüche, die an das Kameraobjektiv zu stellen sind. Es soll das ganze ausgedehnte Sternspektrum auf der ganzen Platte zu scharfer Abbildung bringen, ohne daß die Platte zu stark gegen die optische Achse der Kamera geneigt werden muß, und in den meisten Fällen soll es ein großes oder sogar sehr großes Öffnungsverhältnis, also eine relativ kurze Brennweite besitzen, damit der Spektrograph möglichst lichtstark wird. Das sind Bedingungen, die selbst heute bei dem hohen Stande der technischen Optik sich nicht restlos erfüllen lassen, so daß man besonders bei Objektiven von sehr großem Öffnungsverhältnis meist auf völlige Scharfe der Abbildung verzichten muß. K. SCHWARZSCHILD² hat die Aufgabe, ein Kameraobjektiv für Spektrographen zu berechnen, theoretisch behandelt, nachdem schon J. HARMANN³ und J. WILSING⁴ sich mit diesem Problem beschäftigt hatten. Es sei auf diese drei Abhandlungen hingewiesen.

Bei den älteren Spektrographen ist als Kameraobjektiv ein Objektiv vom Typus des astronomischen Fernrohrs verwendet worden. Es ist zur Bestimmung der Radialgeschwindigkeiten meist nur ein sehr kleines Stück des Sternspektrums gemessen worden, das sich durch ein solches Objektiv mit guter Scharfe abbilden

¹ Ap J 68, S 425 (1928), 74, S 209 (1931) = Mt Wilson Contr Nr 432

² Sitzber Akad Wiss Berl Math Phys Kl 1912, S 1220

³ Z f Instrk 24, S 257 (1904)

⁴ Z f Instrk 26, S 101 (1906)

laßt Da es sich damals um die Untersuchung der helleren und hellsten Sterne handelte, brauchte das Objektiv auch kein großes Öffnungsverhältnis zu besitzen, das sich ja bei dieser Art von Objektiven nicht herstellen laßt So wurde seine Öffnung meist etwas größer als die des Kollimatorobjektives, seine Brennweite gleich oder ein wenig kleiner als dessen Brennweite gewählt Es ist bekannt, daß ältere Spektrographen dieser Art Resultate von ganz ausgezeichneter Genauigkeit lieferten Erst später, als man zu schwächeren Sternen übergang, wurde die Frage der Lichtstärke des Spektrographen aktuell und damit auch die nach der Herstellung von Kameraobjektiven mit großem Öffnungsverhältnis

Zunächst griff man zu den lichtstarken Objektiven, die der Photograph für seine Zwecke verwendet, und manche Typen dieser Objektive, beispielsweise die Tessare von ZEISS, erwiesen sich als sehr brauchbar, so daß sie auch jetzt noch vielfach Verwendung in Sternspektrographen finden

Dann bezeichneten HARTMANN und SCHWARZSCHILD ihre „Chromate“, letzterer einen Typus vom Öffnungsverhältnis 1/4,5, deren Ausführung von ZEISS in Jena übernommen wurde Diese Objektive ermöglichen eine sehr scharfe Abbildung eines großen Stückes des Sternspektrums, erfordern aber eine ziemlich starke Neigung der Platte gegen die optische Achse, was gewisse Schwierigkeiten mit sich bringt Eine gering fehlerhafte Einstellung des Fokus erzeugt merkbliche Fehler in den Radialgeschwindigkeiten

Eine große Zahl von Kameraobjektiven verschiedener Typen hat 1909 J S PLASKETT¹ auf ihre Eignung für Spektrographen mit einem oder drei Prismen untersucht Er ist 1923 nochmals auf dieses Thema zurückgekommen, als er den Spektrographen für das Victoria-Observatorium konstruierte² Inzwischen hatte G W MOFFITT³ Kameraobjektive von großem Öffnungsverhältnis (bis 1/2) berechnet, die ein modifizierter PETZVAL-Typus sind J S PLASKETT hat ein solches von 3 inch Öffnung und 10 inch Brennweite mit dem obenerwähnten Spektrographen ausprobiert und gefunden, daß es bei zwei oder drei Prismen ausgezeichnete Definition und ein ebenes Feld gibt, während letzteres bei Verwendung von nur einem Prisma stark konvex gekrümmt ist PLASKETT führt aus, daß diese Konvexität von den chromatischen Aberrationen der Linsen von Kollimator und Kamera herrührt Diese Aberration wird bei Verwendung von zwei oder drei Prismen nahezu kompensiert durch die normale Bildfeldkrümmung der Kameralinsen MOFFITT hat dann aber auch für Einprismenspektrographen ein Kameraobjektiv vom Öffnungsverhältnis 1/3 berechnet und hergestellt

Ein Kameraobjektiv mit dem extrem großen Öffnungsverhältnis $o/f = 1,6$ hat 1930 W B RAYSON konstruiert Es ist die achtfache Vergrößerung eines Mikroskopobjektives und besitzt 50 mm Öffnung bei 32 mm Brennweite M L HUMASON⁴ hat es bei einem Spektrographen für das 100 inch-Teleskop (Cassegrainfokus) des Mt Wilson-Observatoriums verwendet und zur Aufnahme der Spektra der schwächsten Objekte, besonders der kleinen schwachen Spiralnebel, benutzt Der Kollimator dieses Spektrographen hat eine Brennweite von 61 cm, das Flintglasprisma einen brechenden Winkel von 60° Die Dispersion pro mm beträgt 418 Å bei $\lambda = 4350$ Als Spaltweite wird für Sterne 0,18 mm, für Nebel 0,20 bis 0,60 mm verwendet Die Definition der Spekttra ist nach der Aussage von HUMASON sehr gut Für die Bestimmung der Radialgeschwindigkeit von Sternen eignet sich dieser Spektrograph wegen der sehr kleinen Dispersion

¹ Ap J 29, S 290 (1908), Report of the Chief Astronomer for 1909, S 170 Ottawa 1910

² Pop Ast 31, S 659 (1923), Ap J 59, S 65 (1924)

³ J Opt Soc Amer 8, S 365 (1921)

⁴ Ap J 71, S 351 (1930) = Mt Wilson Contr Nr 400

nicht, der wahrscheinliche Fehler einer Sternaufnahme beträgt ± 50 km, bei Nebelaufnahmen ± 100 km. Bei den enormen Radialgeschwindigkeiten dieser Objekte spielt aber ein solcher Fehler keine Rolle. Der Spektrograph eignet sich aber für das Studium der Spektren sehr schwacher Sterne, wie der Novae in Spiralnebeln. Dieses RAYTON-Objektiv hat die Expositionszeiten im Verhältnis von 1:2 bis 1:3 gegenüber dem vorher benutzten Kameraobjektiv herabgemindert, so daß sich noch Nebel spektiographieren lassen, deren Aufnahme früher ganz aussichtslos war. HUMASON gibt in seiner Abhandlung (The Rayton Short-Focus Spectrographic Objective¹) einige Abbildungen, welche es gestatten, sich eine Vorstellung von den Aufnahmen mit diesem Spektrographen zu machen. Nähere Angaben über die Optik dieser Kameralinse hat W. B. RAYTON in seiner Abhandlung „Two High-speed Camera Objectives for Astronomical Spectrographs“ gemacht².

Wie man aus vorstehenden Erörterungen sieht, lassen sich allgemeine Vorschriften, welches Kameraobjektiv für einen bestimmten Spektrographen geeignet ist, nicht geben. Es ist vielmehr durch praktische Versuche mit verschiedenen Objektivtypen festzustellen, welches zu wählen ist. Da heute zahlreiche Objektive auch mit sehr großem Öffnungsverhältnis (bis zu 1:1) in ausgezeichnete Ausführung im Handel sind (Kinoobjektive), wird sich wohl stets eines finden lassen, welches für den speziellen Zweck brauchbar ist.

d) Die Spaltblende

12 Allgemeines Die Radialbewegung eines Sterns gegen die Erde wird aus der Verschiebung des Sternspektrums gegen das Spektrum einer auf der Erde befindlichen künstlichen Lichtquelle bestimmt. Die Spektren beider Lichtquellen dürfen auf der Platte nicht zusammenfallen, es muß daher eine Vorrichtung vorhanden sein, die es gestattet, während der Belichtung der Vergleichslichtquelle den Teil des Spaltes zu verdecken, durch den das Sternlicht geht. Bedingung für die Abblendevorrichtung ist, daß der Weg des Lichtes der Vergleichslichtquelle möglichst nahe identisch ist mit dem Weg des Lichtes des Sterns im Spektiographen oder mit anderen Worten: Die Kollimatorlinse muß völlig erleuchtet sein durch das Licht, welches von jedem Punkt der beleuchteten Stelle des Spaltes herrührt. Wenn früher öfters eine Vakuumröhre mit leuchtendem Wasserstoff oder Helium in so großer Entfernung vom Spalte als Vergleichslichtquelle benutzt wurde, daß nur ein sehr geringer Teil des vom Fernrohrobjektiv kommenden Sternlichtes verlorenging, so ist die obige wesentliche Bedingung nicht erfüllt gewesen. Die Kollimatorlinse war nur unvollständig und anders als durch den Stein erleuchtet, durch optische Mängel in den Linsen oder in den Prismen wurden die Radialgeschwindigkeit fehlerhaft werden.

Eine zweite Bedingung, und zwar mechanischer Art, kommt hinzu. Ist die Spaltblende so eingerichtet, daß sie im Verlauf der Aufnahme bewegt oder verschoben werden muß, so darf die ganze Einrichtung nicht auf dem Spaltkopf angebracht sein, da dieser durch die Bewegung der Blende leicht, wenn auch vielleicht nur wenig, aus seiner Lage gegen die anderen optischen Teile des Spektiographen gebracht werden kann. Die Blendenvorrichtung soll in diesem Fall an dem Gehäuse des Spektiographen oder an dem Gestell, mit welchem dieser am Fernrohr angesetzt wird, angebaut sein. Die einfachste derartige Vorrichtung ist eine verschiebbare Blende, welche in der einen Lage das Licht des Sterns durchläßt und das der Lichtquelle abblendet, in der anderen Lage den Spalt für die Lichtquelle frei läßt, ihn aber für den Stern bedeckt.

¹ Ap J 71, S. 351 (1930) = Mt Wilson Contr. Nr. 400

² Ap J 72, S. 59 (1930)

31 Die Spaltblende von J. HARTMANN Als Beispiel einer einfachen, aber sehr praktischen Spaltblende sei die von J HARTMANN¹ beschriebene Dicht vor dem Spalt ist ein Schieber aus Messingblech angebracht, der sich senkrecht zur Richtung des Spaltes etwa 2 cm hin und her bewegen läßt. Der Schieber enthält eine Öffnung von der aus Abb 12 ersichtlichen Form. Der mittlere Teil der Öffnung ist ein Rechteck $ABCD$ von etwas mehr als der Höhe des Spaltes und von genügender Breite. An diese Öffnung setzt sich links ein gleichschenkliges Dreieck EFG , welches ermöglicht, einem in der Mitte des Spaltes erzeugten Spektrum eine beliebige Breite von etwa 3 mm herab bis zu etwa 0,1 mm zu geben. Nach rechts hin setzt sich an die Seite BC ein Rechteck $HIKL$, in welches eine dem Dreieck EFG ähnliche Zunge MNO hineinragt. Durch diese Zunge kann man eine bis zu 3 mm lange Strecke in der Mitte des Spaltes zudecken, während neben derselben der Spalt zur Aufnahme der Vergleichsspektren frei bleibt. Um den Vergleichsspektren eine Breite gleich der des Sternspektrums zu geben, ist auf dem Schieber noch ein zweiter, kleinerer angebracht, der nur eine dreieckige Öffnung PQR enthält, die in ihrer Form möglichst der Zunge MNO gleicht, von welcher sie beim Gebrauche, wie aus Abb 13 ersichtlich, zum Teil ausgefüllt wird. Dieser obere Schieber läßt sich auf dem unteren in der Richtung senkrecht zum Spalte um einige Millimeter verschieben und wird vom Stege S durch Reibung festgehalten. Je nachdem man ihn in einer mehr oder weniger nach links gelegenen Stellung auf dem unteren Schieber einstellt, bekommen die Vergleichsspektren eine größere oder geringere Breite. Die Bewegung der ganzen Blende wird seitlich begrenzt durch die verstellbaren Anschlagsschrauben U und V , gegen welche der Vorsprung T , der auch zugleich als Griff dient, stößt. Durch diese Anschläge ist es ermöglicht, stets wieder genau dieselben Stellen der Blende vor den Spalt zu bringen und so während einer Reihe von Aufnahmen allen Spektren die gleiche Breite zu geben. Die HARTMANNsche Blende ist möglichst nahe vor dem Spalt anzubringen. Da sie aber bewegt wird, wenn man vom Sternspektrum auf das Vergleichsspektrum übergeht oder umgekehrt, soll sie am Spektrographengestell und nicht am Spaltkopf selbst befestigt sein. Zur Belichtung des Vergleichsspektrums wird in den Lichtweg ein Spiegel eingeschoben bzw. vorgeklappt, der 45° gegen die Kollimatorachse geneigt ist und das Licht einer kleinen, seitlich befindlichen Bogenlampe in den Spektrographen hineinreflektiert.

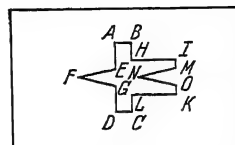


Abb 12 Spaltblende nach HARTMANN

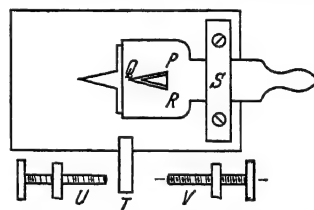


Abb 13 Spaltblende nach HARTMANN

genau dieselben Stellen der Blende vor den Spalt zu bringen und so während einer Reihe von Aufnahmen allen Spektren die gleiche Breite zu geben. Die HARTMANNsche Blende ist möglichst nahe vor dem Spalt anzubringen. Da sie aber bewegt wird, wenn man vom Sternspektrum auf das Vergleichsspektrum übergeht oder umgekehrt, soll sie am Spektrographengestell und nicht am Spaltkopf selbst befestigt sein. Zur Belichtung des Vergleichsspektrums wird in den Lichtweg ein Spiegel eingeschoben bzw. vorgeklappt, der 45° gegen die Kollimatorachse geneigt ist und das Licht einer kleinen, seitlich befindlichen Bogenlampe in den Spektrographen hineinreflektiert.

14 Die Spaltblende von W H WRIGHT Während bei dieser Art Spaltblende die Belichtung durch den Stein unterbrochen werden muß, wenn das Vergleichsspektrum aufkopiert wird, ist dies bei der von W H WRIGHT konstruierten Blende nicht erforderlich. Da auch diese sich als sehr zweckmäßig erwiesen hat und bei neueren Apparaten vielfach in mehr oder minder geänderter Form angewendet wird, werde auch sie hier beschrieben.²

In dem oberen Teil der Abb 14 ist die Blende von vorn gesehen in der Ebene senkrecht zur Kollimatorachse, im unteren Teil ist ein Durchschnitt durch den Kollimator und den Spalt gegeben. Es ist ss' der Spalt, P , P' sind

¹ Zf Instrk 20, S 57 (1900) = Ap J 12, S 16 (1900)² Ap J 12, S 274 (1900)

kleine Reflexionsprismen, die auf beweglichen Schlittenführungen c, c' befestigt sind. Letztere können durch eine rechts- und linkshändig geschnittene Schraube M bewegt werden, so daß die Höhe des Spaltes beliebig verändert werden kann. L und L' sind Kondensorlinsen von 19 mm Brennweite, welche die zwischen den Eisenelektroden I und I' überspringenden Funken auf dem Spalte in den Punkten s und s' abbilden. Die Linien IL und $I'L'$ machen einen Winkel von 8° mit der Spaltplatte, die Winkel bei s und s' betragen 49° . Da die Lage des Brennpunktes des Lick-Refraktors bei Temperaturänderungen ziemlich stark variiert und der ganze Spektrograph sich nicht in Richtung der optischen Achse des

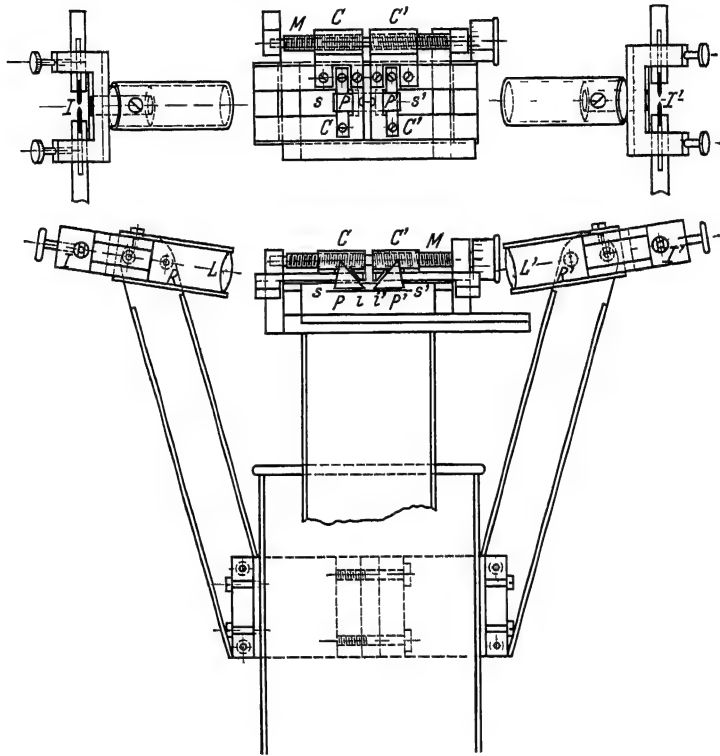


Abb 14 Spaltblende von W H WRIGHT

Refraktors verschieben laßt, mußte der Kollimator verschiebbar gemacht werden und die Spaltblende nebst den Vergleichslichtquellen am Kollimator selbst, statt am Spektrographengestell angebracht werden, so daß die zweite obige Bedingung nicht erfüllt ist. Bei dem sehr stabilen Aufbau des Lickspektrographen sind aber Störungen hierdurch nicht eingetreten, zumal die ganze Vorrichtung für die Aufkopierung der Vergleichsspektren nicht berührt zu werden braucht, wenn sie erst einmal vor Beginn der Arbeiten eingestellt ist. Den beiden Linsen L und L' , welche die Funken zwischen den Elektroden auf den Spalt projizieren, ist eine größere Öffnung (9 mm) als nötig (2 mm) gegeben worden, damit die Kollimatorlinse unter allen Umständen voll und gleichmäßig erleuchtet ist. Natürlich sind trotzdem die Linsen und die Elektroden genau zu justieren.

W H WRIGHT benutzt als Vergleichsspektrum das Funkenpektrum zwischen Eisenelektroden. Bei den meisten neueren Spektrographen wird aber

das Bogenspektrum zwischen geeigneten Metallelektroden (Fe, Ti, Legierungen von Fe + Ti, Fe + V usw.) bevorzugt. Es ist dann an Stelle der Projektionsvorrichtung zur Erzeugung des Funkens eine kleine Bogenlampe angebracht, die an das Lichtnetz angeschlossen wird und es gestattet, einen Bogen bei niedrigerer Stromstärke zu brennen. Durch Vorschaltung einer geeigneten Mattscheibe wird das Licht des Bogens diffus gemacht.

15 Die Spaltblende von J S PLASKETT Eine Vereinigung der Vorzüge beider oben beschriebenen Spaltblendenvorrichtungen ist in der von J S PLASKETT¹ konstruierten erreicht worden, deren Hauptteile nun noch kurz beschrieben werden sollen. Genau über dem Spalt sind zwei rechtwinklige Prismen angebracht, welche das Licht der Vergleichslampe von seiner ursprünglichen Richtung, senkrecht zur optischen Achse des Kollimators und ebenfalls senkrecht zum Spalt ablenken, und es so durch den Spalt hindurch in den Spektrographen hineinreflektieren. Die Kanten der Prismen liegen parallel zum Spalt, nicht senkrecht wie bei der WRIGHTSchen Konstruktion. Sie können in Kontakt gebracht oder symmetrisch zur Mitte der Länge des Spaltes voneinander entfernt werden mit Hilfe einer rechts- und linkshändig geschnittenen Schraube. Die Fassungen der Prismen, der Mechanismus zur Trennung derselben und die Prismen selbst können als Ganzes senkrecht zum Spalt bewegt werden, in der Richtung zur Lichtquelle hin oder von ihr hinweg. Die Prismen werden nebst ihren Fassungen durch dünne Metallplatten gehalten, welche sich genau über den Spaltbacken befinden, ohne sie aber zu berühren. Diese Metallplatten haben die Gestalt der Abb. 15 und dienen gleichzeitig als Blenden zur Begrenzung der Länge und Lage des Stern- und des Vergleichsspektrums. Die keilförmige

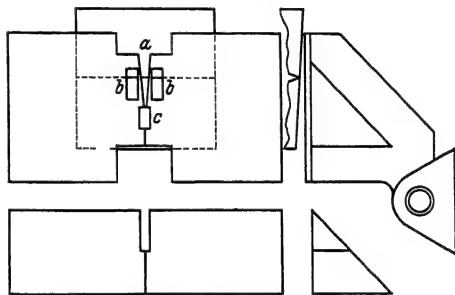


Abb 15 Spaltblende von PLASKETT

Öffnung *a* zwischen den beiden Platten begrenzt die Breite des Sternspektrums. Sind die Platten und Prismen in Kontakt, so gibt die keilförmige Öffnung *a* eine Breite des Sternspektrums von 0 bis 0,5 mm. Damit das Licht des Sterns zum Spalt kann, ist eine rechteckige Kerbe von genügender Breite in die Kanten der Prismen eingeschliffen, und zwar da, wo sie über die keilförmige Öffnung *a* kommen. Außerhalb dieser Öffnung sind zwei rechteckige Öffnungen *b, b* von 1 mm Breite und 6 mm Länge in jede der beiden Platten gemacht, so daß das Vergleichslicht, welches von den Hypotenusen der Prismen reflektiert wird, durch den Spalt hindurchgehen und ein Vergleichsspektrum zu beiden Seiten des Sternspektrums erzeugen kann, genau symmetrisch zu diesem, mit Linien von stets derselben Länge und demselben Abstand voneinander, solange die Distanz der Prismen nicht geändert wird. Für die Sternaufnahmen sind die Prismen und die Diaphragmenplatten in Kontakt, die Breite des Sternspektrums kann beliebig zwischen 0 und 0,5 mm dadurch eingestellt werden, daß die ganze Spaltblendenvorrichtung so weit verschoben wird, bis die gewünschte Breite erreicht ist. Stets sind die zwei Öffnungen *b* für das Vergleichsspektrum über dem Spalt, das Vergleichsspektrum kann also aufgenommen werden, wann und so oft es gewünscht wird, ohne daß der Spaltkopf berührt oder die Sternbelichtung unterbrochen wird. PLASKETTS Spaltblendenvorrichtung hat gegenüber der

¹ Publ. Dom. Astrophys. Obs. Victoria, B C 1, S 85 (1922)

von WRIGHT den Vorzug, daß nur eine Lichtquelle und nicht zwei verschiedene für die Aufkopierung des Vergleichsspektrums nötig sind. Die Vergleichslinien erscheinen daher auf der photographischen Platte in der gleichen Intensität zu beiden Seiten des Sternspektrums, was sich wohl mit der WRIGHTSchen Vorrichtung nur schwer erreichen läßt. Weiterhin ist die Vergleichslichtquelle nicht am Kollimatorrohr befestigt, sondern am Spektrographengestell, und ist somit völlig getrennt vom Spaltkopf.

16 Wann und wie oft soll das Vergleichsspektrum aufkopiert werden? Die Frage, wie oft und wann man das Vergleichsspektrum aufkopieren soll, ist viel erörtert worden. Meist genügt es, vor und nach der Sternaufnahme das Vergleichsspektrum zu belichten, evtl. noch ein drittes Mal in der Mitte der Aufnahme. Am Lick-Observatorium finden vier Belichtungen des Vergleichsspektrums statt:

- 1 die starken Fe-Linien auf die eine Seite des Sternspektrums,
- 2 „ schwachen „ „ „ andere „ „ „
- 3 „ schwachen „ „ „ erste „ „ „
- 4 „ starken „ „ „ zweite „ „ „

W. H. WRIGHT hat ganz allgemein¹ untersucht, wie man am besten die Belichtungen des Vergleichsspektrums während einer Sternaufnahme anordnet. Die Änderung der Biegung und auch eventuelle Temperaturänderungen im Spektrographen verlaufen nicht proportional der Zeit t . Wenn man sich die Lage einer Spektrallinie als Funktion der Zeit, gezählt von der Mitte der Exposition, durch eine Potenzreihe $x = a + bt + ct^2 + dt^3 + \dots$, dargestellt denkt, ist die mittlere Lage x_0 des kontinuierlich während der Zeit T aufgenommenen

Sternspektrums durch $x_0 = a + \frac{c}{12} T^2$ gegeben. Bei diskontinuierlichen Aufnahmen des Vergleichsspektrums hat man daher darauf zu achten, daß im Mittel derselben das quadratische Glied den Faktor $c/12$ erhält, während die ungeraden Potenzen durch symmetrische Anordnung gegen die Mitte der Belichtung von selbst herausfallen. Bei der Besprechung der Arbeit von WRIGHT führt KUSTNER² noch folgendes aus: Wird das Fe-Spektrum zu Anfang und zu Ende aufgenommen, so erhält c den Faktor $\frac{1}{4}$, so daß ein Fehler von $\frac{c}{6} T^2$ in der Lage der Fe-Linien relativ gegen die Sternlinien entsteht. Es wäre dann eine Aufnahme in der Mitte, deren Fehler $\frac{c}{12} T^2$ sein würde, noch vorzuziehen.

Verläuft die photographische Lichtwirkung proportional der Zeit, so kann der verlangte Faktor $c/12$ und damit die genaue Elimination der quadratischen Zeitglieder so erzielt werden, daß man das Fe am Anfang τ sec, in der Mitte 4τ sec und am Ende nochmals τ sec exponiert (SIMPSONSCHE Regel). Bei längeren Sternaufnahmen zieht es KUSTNER vor, zur besseren Elimination unregelmäßiger und zufälliger Änderungen im Spektrographen mehr Fe-Spektren aufzunehmen und diese zum Teil nicht auf, sondern dicht nebeneinander zu legen, was mit der HARTMANNschen Blende möglich ist, weil so in jedem gegebenen Fall die tatsächlich eingetretene Verschiebung durch die Messung scharf kontrolliert werden kann. Es stehen dann zahlreiche Kombinationen zur Verfügung, die den Faktor $c/12$ entweder streng oder mit hinreichender Genauigkeit ergeben und die sich allmählich dem Grenzfall sehr zahlreicher, gleich langer, in sehr kurzen Pausen erfolgender Expositionen nähern. Das Idealste wäre es natürlich, das Vergleichsspektrum kontinuierlich mit dem Stern aufzunehmen. Die Spaltblende- und Vorrichtung von WRIGHT wurde dies gestatten.

¹ Ap J 12, S 277 (1900)

² A N 166, S 205 (1904)

17 Spaltweite und Expositionszeit Die größte Spaltweite, die angewendet werden darf, ist die, welche dem Durchmesser des vom Fernrohr erzeugten Sternbildchens entspricht. Es ist dabei der Luftruhezustand zu berücksichtigen, von dem die Größe des Sternscheibchens weitgehend beeinflußt wird. Man vergleiche hierzu die wertvollen Untersuchungen von NEWALL¹, der diesem Umstande eine besondere Behandlung gewidmet hat.

Eine jede Verengung des Spaltes erzeugt einen Lichtverlust und damit eine Verlängerung der Expositionszeit. Dieser Lichtverlust entsteht aus zwei Ursachen: erstens tritt bei Verengung des Spaltes überhaupt weniger Licht in den Apparat hinein und zweitens wird das Beugungsbild des erleuchteten Spaltes verändert. Die sekundären Lichtmaxima des Beugungsbildes rücken bei Verengung des Spaltes weiter ab von der optischen Achse, und das zentrale Beugungsbild verbreitert sich. Von einer gewissen Spaltbreite ab fallen nun zuerst die Nebenmaxima und bei weiterer Verengung des Spaltes auch Teile des zentralen Bildes nicht mehr auf das Kollimatorobjektiv, sondern auf die Wände des Kollimatorrohrs. Es geht also Licht verloren, und zwar um so mehr, je enger der Spalt ist.

Eine experimentelle Untersuchung der Verhältnisse ruht von J. H. MOORE² her. Er richtete den Lick-Refraktor, an welchem der neue MILLS-Spektrograph angesetzt war, nach dem Nordhimmel und nahm bei verschiedenen Spaltbreiten Spektren des Himmelslichtes auf. Die Expositionszeiten wurden so abgestimmt, daß alle Spektren sehr nahe gleiche Schwarzung aufwiesen. Aus diesen Versuchen ergaben sich die in der nebenstehenden Tabelle angeführten Zahlen. Trägt man die Spaltweiten als Abszissen, die Expositionszeiten als Ordinaten auf und zieht eine Kurve durch die so erhaltenen Punkte, so zeigt sich, daß diese Kurve eine starke Krümmung aufweist und bei kleinen Spaltweiten sehr steil ansteigt. Ware keine Beugung vorhanden, so würden die Intensitäten und angenähert auch die Expositionszeiten proportional der Spaltweite sein, und die Kurve würde zu einer gegen die Abszissenachse geneigten Geraden. Der Lichtverlust infolge von Beugung ist also sehr merklich, und er wächst besonders schnell bei kleinen Spaltweiten.

Dieser Lichtverlust wurde sich kompensieren lassen dadurch, daß man dem Kollimatorobjektiv eine entsprechend größere Öffnung geben wurde bei unveränderter Brennweite. Hierdurch wurde nämlich die Reinheit P des Spektrums nach der Formel von SCHUSLER abnehmen und man mußte das Auflösungsvermögen R des Prismensystems entsprechend vergrößern, wenn die Reinheit unverändert erhalten werden soll. Dieses Verfahren dürfte schließlich durch technische Schwierigkeiten (sehr große Prismen) begrenzt sein.

Es bleibt daher in allen Fällen, in denen es sich um die Aufnahme der Spektren lichtschwacher Sterne handelt, nichts weiter übrig, als auf eine große Reinheit zu verzichten und das einfachste Mittel anzuwenden: den Spalt so weit zu öffnen, wie es der Durchmesser des durch das Fernrohr erzeugten Sternbildchens bei mittlerer Luftruhe erlaubt. Die Lichtmenge, die dann in den Spektrographen hineinkommt, ist die größtmögliche, und die Schwächung durch die Beugung hält sich in mäßigen Grenzen. Die Dauer der Exposition hängt

Spaltweite	Expositionszeit
0,102 mm	13,0 sec
89	15,0
76	17,5
63	22,0
51	30,0
46	34,5
38	42,5
33	49,5
30	55,0
25	66,0
23	77,0
20	86,5
18	103,0
15	134,0
13	172,0

¹ M N 65, S 618 (1905)

² Lick Bull 3, S 42 (1904) = Ap J 20, S 285 (1904)

dann von dem Verhältnis der Brennweiten des Kollimator- und des Kameraobjektives ab. Je länger der Kollimator im Verhältnis zur Kamera ist, um so kurzer wird die Belichtungszeit.

Beispielsweise gibt J H MOORE 0,033 mm als die häufigst angewendete Spaltweite des neuen MILLS-Spektrographen an, und er fußt aus, daß die Reinheit der Spektren immer noch genügend groß ist, so daß die Genauigkeit der Messung des Spektrums nicht leidet.

Kommt es darauf an, die Spaltweite genau zu kennen, so genügt es nicht, sie mit der die Spaltbacken bewegenden Schraube zu messen, da der Nullpunkt der Spaltweite, d. h. die Schraubeneinstellung, bei der der Spalt völlig geschlossen ist, sich nicht genau festlegen läßt und außerdem nicht konstant bleibt, sondern sich bei häufigem Gebrauch der Spaltschraube verschiebt. Es ist dann ein Verfahren zu wählen, das NEWALL¹ ausgearbeitet hat und „diffractional method of estimating slit-widths“ nennt. Im allgemeinen wird dieser Fall nur selten vorkommen.

18 Spaltweite und Reinheit des Spektrums Die Spaltweite bestimmt nicht nur die Expositionszeit, die nötig ist, um mit einem gegebenen Spektrographen das Spektrum eines Sternes bestimmter Helligkeit zu erhalten, sondern auch die „Reinheit“ (Purity) des Spektrums. Als Beziehung zwischen Spaltweite s und Reinheit P benutzt man die bekannte Formel von A SCHUSTER²

$$P = \frac{\lambda R}{\lambda + s\psi},$$

in der R das Auflösungsvermögen, λ die Wellenlänge und ψ das Öffnungsverhältnis (angulare Öffnung) des Kollimators ist. Inwieweit diese Formel für astrospektrographische Aufnahmen angewendet werden darf, wo kontinuierliche Spektren mit Absorptionslinien die Regel sind, während die Ableitung der Formel für diskontinuierliche Spektren (Emissionsspektren) gilt³, ist bisher nicht untersucht worden. Ebenso wenig liegt ein quantitativer Vergleich der Formel mit den Ergebnissen von Versuchen vor. Es finden sich nur vereinzelte Angaben, wo nach dieser Formel berechnete, also theoretische Reinheiten mit den aus entsprechenden Beobachtungen folgenden Werten verglichen sind. Im allgemeinen zeigt sich aus diesen Angaben, daß die tatsächliche Reinheit nahe gleich der berechneten ist, so daß man hieraus wohl schließen darf, daß die Formel von SCHUSTER wenigstens qualitativ richtige Werte auch für kontinuierliche Spektren gibt.

Beispielsweise gibt W W CAMPBELL⁴ für den MILLS-Spektrographen, dessen Kollimatoröffnung 37,4 mm, Kollimatorbrennweite 722 mm ist, folgende Zahlen: $R = 74,2$, $s = 0,0084$ mm, $P = \frac{1}{2}R = 37,1$. Es mußten danach zwei monochromatische Linien noch trennbar sein für $\Delta\lambda = 0,117$ Å. Die Beobachtung zeigte, daß bei dieser Spaltweite die Linien $\lambda 4348,003$ und $\lambda 4348,130$ ($\Delta\lambda = 0,127$) leicht getrennt werden konnten. Sie waren gerade noch getrennt für eine Spaltweite von 0,012 mm, für welche Spaltbreite die theoretische Trennung $\Delta\lambda = 0,142$ Å ist.

Mit einer Spaltweite von $s = 0,02$ mm, $P = 21,9$ ist nach der Formel $\Delta\lambda = 0,198$ Å. Die beiden Linien des Sonnenspektrums $\lambda 4320,907$ und $\lambda 4321,119$ ($\Delta\lambda = 0,212$ Å) zeigten sich völlig getrennt, und sie blieben getrennt, bis der Spalt auf 0,029 mm geöffnet wurde. Die dieser Spaltweite entsprechende

¹ M N 65, S 609 (1905)

² H KAYSER, Handb der Spektroskopie I, S 551ff u 576ff (1900), A SCHUSTER, Introduction to the Theory of Optics, S 140ff 1904, The Optics of the Spectroscope Ap J 21, S 97 (1905)

³ A SCHUSTER, Introduction, S 148

⁴ Ap J 8, S 135 (1898)

theoretische Zahl wurde $\Delta\lambda = 0,261 \text{ \AA}$ sein. Diese Angaben beziehen sich sämtlich auf eine visuelle Beobachtung des Spektrums.

CAMPBELL hat aber auch einige Zahlen für photographische Aufnahmen gegeben. Mit EASTMAN lantern plates ließen sich Linien gerade noch bis $\Delta\lambda = 0,15 \text{ \AA}$ trennen, Linien mit $\Delta\lambda = 0,20 \text{ \AA}$ waren weit getrennt. Mit hochempfindlichen Platten und einer Spaltweite von $0,02 \text{ mm}$ waren auf einigen Sternspektrogrammen die Linien $\lambda 4337,216$ und $\lambda 4337,414$ ($\Delta\lambda = 0,198 \text{ \AA}$) gerade noch getrennt, das ist genau die theoretische Grenze für $s = 0,02 \text{ mm}$. Letztere Angaben zeigen außerdem, wie stark die Reinheit des Spektrums durch die Korngröße der photographischen Emulsion beeinflußt wird. Analoge Resultate wurden mit dem Spektrographen IV (3 Prismen, Öffnung des Kollimators 30 mm , Brennweite 300 mm , Kamerabrennweite 350 mm) des Potsdamer Observatoriums erhalten. Bei Anwendung fast kornloser, lichteoffreier Platten ließen sich die beiden Cr-Linien $\lambda 4333,617$ und $\lambda 4333,882$ des Sonnenspektrums bei einer Spaltweite von $s = 0,01 \text{ mm}$ gerade eben noch trennen, wenn die Exposition genau richtig war und eine geeignete Entwicklungsmethode angewendet wurde. Auf hochempfindlichen Platten war nicht nur keine Trennung mehr vorhanden, sondern diese Doppellinie hob sich nur noch so wenig von dem kontinuierlichen Grunde ab, daß sie nur mit geringer Genauigkeit zu messen war.

Die Trennungsfähigkeit eines Spektrographen wird bei Aufnahmen von Sternspektren niemals wirklich ausgenutzt, da sie durch den photographischen Prozeß in sehr erheblichem Maße herabgesetzt wird, indem die lineare Ausdehnung des Spektrums auf der Platte fast stets viel zu gering ist im Verhältnis zu Größe des Kornes der Emulsionsschicht. Eine Verlängerung der Kamerabrennweite oder die Verwendung sehr feinkorniger Platten erhöht daher die praktische Trennungsfähigkeit des Spektrographen, die stets wesentlich kleiner als die wirkliche ist.

Es kommt auch hinzu, daß Spaltweiten, wie sie nötig sind, um die volle Reinheit zu erreichen, die ein gegebener Spektrograph liefern konnte, sich in der Praxis kaum anwenden lassen aus dem Grunde, daß die zu spektrographierenden Objekte fast immer zu lichtschwach sind. Bei der Aufnahme schwacher Sterne muß der Spalt so weit geöffnet werden, als es möglich ist, ohne daß zu große Fehler in den Radialgeschwindigkeiten entstehen. Bei der Aufnahme lichtschwacher Objekte wie der Spiralnebel wird der Spalt sogar so weit geöffnet, daß das resultierende Spektrum gerade noch eine durch seine Liniengruppen erzeugte Struktur zeigt, einzelne Linien aber mit Ausnahme der Kalziumlinien H und K überhaupt nicht mehr sichtbar sind. Nur unter dieser Bedingung lassen sich Spektra dieser äußerst lichtschwachen Objekte erhalten.

Spektra, die mit so großen Spaltweiten aufgenommen sind, lassen sich natürlich nicht mehr auf die Weise ausmessen, wie sonst Sternspektra gemessen werden. Man verfährt so, daß man Spektra von hellen Sternen mit bekanntem Spektraltypus und mit bekannter Radialgeschwindigkeit unter Anwendung ebenso großer Spaltweite wie das lichtschwache Objekt aufnimmt und die beiden Spektren dann im Spektrokomparator von HARTMANN oder nach dem Verfahren von CURTISS miteinander vergleicht und die Verschiebung beider Spektren gegeneinander mißt. Eine hohe Genauigkeit läßt sich natürlich nicht erreichen, sie ist auch wohl meist nicht nötig.

Einen praktischen Versuch, in welchem Maße eine Erweiterung des Spaltes die Messungen ungenauer macht, stellte J. S. PLASKETT¹ an. Er benutzte teils einen Spektrographen mit einem Prisma (Kamerabrennweite 525 mm), teils

¹ Ap J 28, S 259 (1908)

einen mit drei Prismen (Kamerabrennweite 525 mm bzw 275 mm) und nahm mit Spaltweiten von 0,025, 0,038, 0,051, 0,076 mm 66 Platten von β Orionis auf. Als Resultat ergab sich, daß wenigstens bei Sternen der frühen Typen eine Spaltbreite von 0,051 mm ohne jede Schädigung der Genauigkeit verwendet werden kann. Systematische Fehler traten nicht auf und die zufälligen erhöhten sich nicht. Bei Benutzung der größeren Dispersion konnte der Spalt ohne Schaden sogar noch weiter als 0,051 mm geöffnet werden. Da der Durchmesser des Sternbildchens im Brennpunkte des Ottawa-Refraktors selbst bei den kürzesten Expositionen selten kleiner als 0,055 mm ist, kann man diesen unerwarteten Befund wohl damit erklären, daß die Luftunruhe und die erheblich längere Belichtungszeit, die bei der Benutzung der großen Dispersion auch bei großer Spaltweite nötig war, so wirkten, als wäre der Spalt in seiner ganzen Breite (0,076 mm) gleichmäßig erleuchtet. Bei Benutzung des Spektrographen mit der kleinen Dispersion traten dagegen bei einer Spaltweite von 0,076 mm systematische Fehler im Betrag von ± 2 km auf, auch wuchsen die zufälligen Fehler recht merklich an.

Wie die vorstehenden Ausführungen zeigen, spielt die Reinheit des Spektrums in der Astrospektrographie nicht die große Rolle wie bei Versuchen im Laboratorium. Die Lichtstärke ist der maßgebende Faktor, die Reinheit des Astrospektrographen ist auch stets weit höher, als sie in der Praxis ausgenutzt werden kann. In einigen Fällen, wie bei der Untersuchung und Identifizierung der einzelnen Linien des Spektrums der hellsten Sterne, ist freilich eine möglichst hohe Reinheit nötig. Man muß Spezialinstrumente für diese Zwecke bauen, die dieser Notwendigkeit Rechnung tragen.

e) Hilfsapparate für den Spektrographen.

19 Der Thermostat und Temperaturregler. In Ziff 2 ist gezeigt worden, daß der Spektrograph während des Gebrauches auf sehr nahe konstanter Temperatur gehalten werden muß, wenn einwandfreie Aufnahmen gelingen sollen. Man hat zuerst geglaubt, dies dadurch erreichen zu können, daß man den Apparat in schlechte Wärmeleiter (wollene Decken, Federkissen, Pelze usw.) einhüllte, aber bald bemerkte man, daß hierdurch der Wärmeaustausch nur verzögert, aber nicht verhindert wird. Bei langer andauernder gleichmäßiger Abnahme der äußeren Luftwärme findet schließlich die Temperaturabnahme innen und außen mit derselben Geschwindigkeit statt. Man muß also eine Vorrichtung um den Spektrographen herum schaffen, die es ermöglicht, den Apparat künstlich zu erwärmen, so daß die Temperatur desselben trotz Sinkens der äußeren Lufttemperatur ungeändert erhalten wird. Ein Steigen der Lufttemperatur während der Beobachtungen, die in den Abend- und Nachtstunden angestellt werden, tritt erfahrungsgemäß nur ganz selten auf, man braucht also auf diesen Ausnahmefall nicht Rücksicht zu nehmen. Es wurde technisch auch nicht leicht sein, für einen Astrospektrographen eine Einrichtung zu schaffen, die auch bei steigender Lufttemperatur die Temperaturkonstanz des Spektrographen gewährleistet. Für fest aufgestellte Spektrographen wie die in einem Laboratorium genügt es, sie in einen überall geschlossenen Metallkasten zu bringen und diesen in ein Wasserbad konstanter Temperatur, etwa fließendes Wasser aus einer städtischen Wasserleitung, zu setzen oder ihn mit schmelzendem Eis zu umgeben. DESLANDRES¹ hat, wohl als einziger, diesen naheliegenden Weg beschritten, obwohl er für einen mit einem Fernrohr verbundenen Spektrographen nicht zu empfehlen ist wegen der großen Belastung des Fernrohrs und der

¹ B A 15, S 49 (1898)

unbequemen Handhabung Es ist daher besser, die sehr seltenen Nächte mit Temperaturanstieg als ungeeignet für spektrographische Beobachtungen anzusehen und sie zu anderen zu verwenden

Eine Konstanthaltung der Spektrographentemperatur bei abnehmender Luftwärme bietet dagegen keinerlei Schwierigkeiten, da sich überall leicht eine regulierbare oder sich automatisch regulierende elektrische Heizeinrichtung bauen läßt Als erster hat H C LORD¹ eine derartige Einrichtung konstruiert und benutzt CAMPBELL und WRIGHT² folgten ihm bald nach, und seitdem ist wohl kein Sternspektrograph ohne eine solche Vorrichtung in Gebrauch Im Prinzip sind diese Heizapparate sämtlich gleich gebaut, sie unterscheiden sich nur in kleinen, meist unwichtigen Einzelheiten, so daß es genügt, hier einen einzigen als Beispiel zu beschreiben

20 Der Thermostat von J HARTMANN Als solcher sei der von J HARTMANN³ gewählt, der auf Grund eingehender thermischer Versuche ausgedacht ist und sich in langjährigem Gebrauch in jeder Beziehung bewährt hat HARTMANN

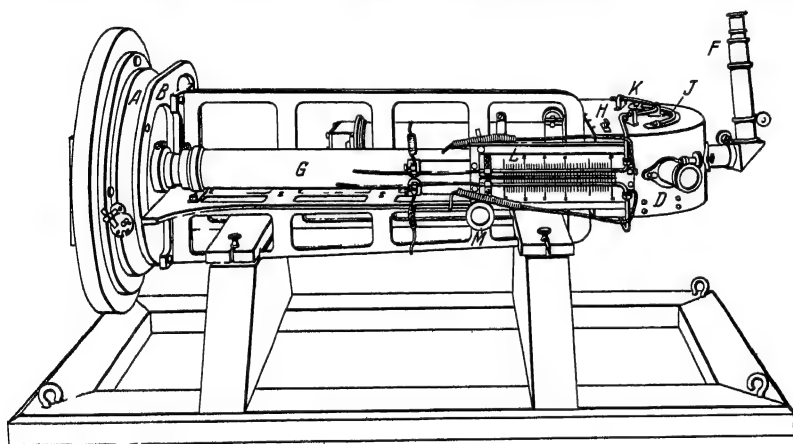


Abb 16 Der Spektrograph III des Potsdamer Observatoriums

bringt, wie vor ihm CAMPBELL und WRIGHT, das Kontrollthermometer (K der Abb 16), das die Temperatur regelt, nicht im Innern der Prismenbuchse an, sondern außerhalb derselben in einem geräumigen, leichten Holzkasten, der den ganzen Spektrographen umschließt Diese Anordnung bietet den Vorteil, daß schon jede kleine Temperaturänderung, die außerhalb der Prismenbuchse eintritt, rechtzeitig durch Einschalten des Heizstromes korrigiert werden kann HARTMANN geht noch einen Schritt weiter, indem er auf beiden Seiten der Prismenbuchse je ein solches Kontrollthermometer anbringt, damit Schichtungen der Temperatur im Kasten möglichst unschädlich gemacht werden In Abb 17 ist das Thermometer innerhalb der Prismenbuchse mit J , das eine der langen, halbkreisförmigen Gefäße von zwei Quecksilberkontaktthermometern⁴ außerhalb der Prismenbuchse mit K bezeichnet Die Kapillaren dieser beiden Thermometer sind durch mehrfache Biegung nach der Seite des Kollimators hingeführt, wo sie parallel nebeneinander auf ihren Skalen L befestigt sind Dicht unter

¹ Ap J 8, S 65 (1898)

² Ap J 11, S 259 (1900)

³ Zf Instrk 21, S 313 (1901), Ap J 15, S 172 (1902)

⁴ Statt der Quecksilberkontaktthermometer sind auch Metallthermometer oder Thermosäulen benutzt worden, die manche Vorteile vor dem Quecksilberthermometer besitzen [Publ Lick Obs 9, S 54 (1907)]

dem Ende der Skalen sind Platindrahte bis zum Kontakt mit dem Quecksilber eingeschmolzen. Durch das offene Ende der 0,5 mm weiten Kapillaren sind zwei 0,3 mm starke Platindrahte eingeführt, die durch Zahntrieb mittels des Schlüssels *M* auf beliebige Punkte der Skalen eingestellt werden können. Der ganze Apparat ist in einen Holzkasten eingeschlossen, der noch durch wärmeisolierende Stoffe gegen plötzliche oder sehr rasche Wärmeänderungen, z. B. durch starken Wind, geschützt werden kann (Abb 17). Im Innern des Kastens sind den halbkreisförmigen Grundflächen der Prismenbuchsen gegenüber zwei elektrische Heizkörper angebracht, der eine dieser Körper ist auf dem geöffneten Deckel in Abb 17 zu sehen. Es ist ein holzerner Rahmen *OO*, der innen zwei Glasstäbe trägt, zwischen denen ein 20 m langer, 0,24 mm starker Neusilber-

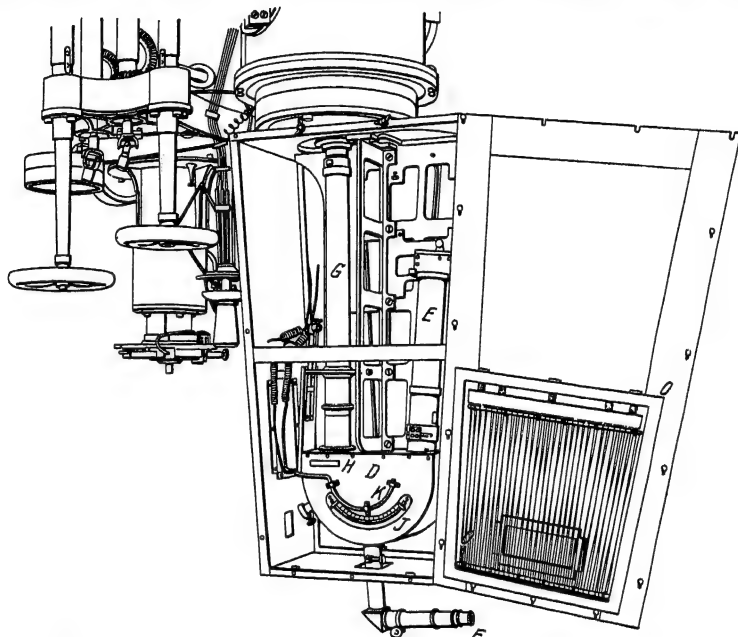


Abb 17 Die Heizeinrichtung des Spektrographen III (Potsdam)

draht in zahlreichen Windungen hin und her gezogen ist. Durch Spiralfedern werden die Drahte bei allen Temperaturen straff erhalten. Der Rahmen ist in 1 cm Abstand von der Wand des Kastens befestigt, und auf der dem Spektrographen zugewendeten Seite ist, ebenfalls in 1 cm Abstand vom Rahmen, ein den ganzen Heizkörper überdeckender Schirm aus blankem Weißblech angebracht (in Abb 17 ist der Schirm entfernt, um die Heizdrahte sichtbar zu machen). Rings um den Heizkörper herum kann daher völlig unbehinderte Luftströmung stattfinden. Diese Strömung im Innern des Kastens ist von größter Wichtigkeit, da ohne dieselbe leicht starke Warmeschichtungen und folglich ungleiche Erwärmungen der einzelnen Teile des Apparates eintreten könnten. Um schon durch die Heizung selbst eine Luftströmung im Kasten hervorzurufen, hat HARTMANN die Heizkörper nicht über die ganzen Flächen des Kastens ausgedehnt, sondern, wie in der Abb 17 ersichtlich, auf denjenigen Teil des Kastens beschränkt, der während der Beobachtungen am tiefsten liegt. Bei der Erwärmung der Drahte wird die warme Luft zunächst nach oben steigen und die dort befindliche abgekühlte Luft herunterdrücken. Erst wenn die erwärmte

Luft auf diese Weise wieder bis zu den Kontrollthermometern K gelangt ist, steigen diese und bewirken dadurch die Unterbrechung des Heizstromes. Um schädliche Wärmeschichtungen im Kasten möglichst auszuschließen, hat HARTMANN die Heizung in zwei ganz selbständige, völlig voneinander unabhängige Teile zerlegt: das obere in der Abb 17 sichtbare Kontrollthermometer K reguliert nur den Strom in dem im Deckel des Kastens befindlichen, in der Abbildung ebenfalls sichtbaren Heizkörper, während das unter der Prismenbuchse befindliche Thermometer unabhängig davon den unteren Heizkörper reguliert. Hat man daher beide Kontrollthermometer vor der Beobachtung auf dieselbe Temperaturhöhe eingestellt, so ist man sicher, daß auf beiden Seiten der Prismenbuchse dauernd dieselbe Temperatur vorhanden sein wird.

In neueren Ausführungen der Heizeinrichtung sind im Innern des Kastens noch zwei kleine Elektromotoren mit fächerähnlichen Windflügeln untergebracht, durch deren Bewegung eine gute Durchmischung der Luft im Innern des Heizkastens erzeugt wird¹.

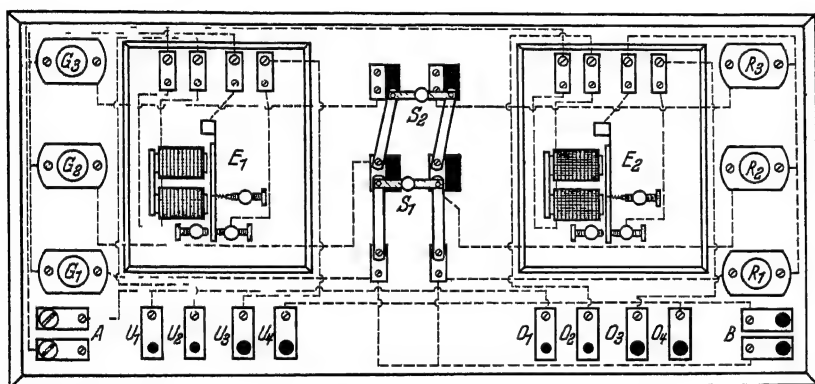


Abb 18 Das Schaltbrett für die Heizeinrichtung

Die acht Drahtleitungen (vier zu den Quecksilberkontaktthermometern und vier zu den Heizspiralen) sind zu zwei 5 m langen Kabeln vereinigt und führen nach einem auf dem Beobachtungsstuhl angebrachten Schaltbrett, dessen Anordnung in Abb 18 dargestellt ist. Auch das Schaltbrett hat zwei getrennte, vollkommen gleichartige Hälften. Die rechte Hälfte entspricht der oberen Heizung, die linke der unteren, in die Stopfelkontakte O_1, O_2, O_3, O_4 und U_1, U_2, U_3, U_4 werden die Enden der Kabeldrahte eingeführt. Die Stopfelöcher O_3, O_4 und U_3, U_4 für die Heizung besitzen einen größeren Durchmesser als die anderen für die Kontrollthermometer, so daß ein Verwechseln der Leitungen nicht möglich ist. Durch die beiden Klemmen A wird der Strom eines LECLANCHÉ-Elements zugeführt. Derselbe geht, wie das Schaltschema Abb 18 zeigt, durch die Elektromagnete der beiden auf Ruhestrom eingestellten Relais E_1 und E_2 und nach den Klemmen O_1, O_2 und U_1, U_2 . Haben die Quecksilberfäden der Thermometer Kontakt mit den Platindrähten, so ist der Relaisstrom geschlossen, die Anker der Elektromagneten sind angezogen und hierdurch ist der Heizstrom unterbrochen. Sinkt eines der Thermometer unter die eingestellte Temperatur, so wird der betreffende Relaisstrom unterbrochen, der losgelassene Anker des Elektromagneten schließt den entsprechenden Heizstrom.

¹ D GILL, Description of the Cape Observatory, Part II, S 30 1913, Publ Dom Astrophys Obs Victoria, 1, S 92 (1922)

Letzterer wird durch die beiden Klemmen B der Schaltbretter zugeführt, er wird dem Lichtnetz (110 Volt) entnommen. Zunächst wird er nach den beiden Doppelschaltern S_1 und S_2 geführt, welche es ermöglichen, je nach Bedarf drei verschiedene Widerstände einzuschalten und hierdurch seine Stärke zu ändern.

Als Widerstände benutzt HARTMANN Glühlampen, die in die Fassungen $R_1 R_2 R_3$ und $G_1 G_2 G_3$ eingeschraubt werden. Sind beide Schalter nach rechts gelegt (wie S_2 in Abb 18), so geht der Strom nur durch die Lampe R_1 bzw G_1 , von da nach dem Relais und, falls dieses geschlossen ist, durch das Kabel nach dem Heizkörper. Schließt man die Verbindung bei S_1 , indem man diesen Schalter wie in der Abbildung nach links legt, so geht der Strom gleichzeitig durch die parallel geschalteten Lampen R_1 und R_2 bzw G_1 und G_2 usw.

Um die beiden Heizkreise leicht unterscheidbar zu machen, hat HARTMANN die der oberen Heizung entsprechenden Lampen (R) rot, die der unteren (G) grün gefärbt. An dem in gleichmäßigen Intervallen erfolgenden Aufleuchten der roten und der grünen Lampen kann der Beobachter ohne weiteres kontrollieren, ob die ganze Heizeinrichtung richtig funktioniert. Die Einstellung der Platinkontakte der Kontrollthermometer K hat nach folgenden Überlegungen zu geschehen. Man beabsichtigt, vom Momente dieser Einstellung an die Temperatur der Prismen konstant zu halten, und zu diesem Zwecke mußte man die Kontakte der augenblicklichen Prismen Temperatur entsprechend einstellen. Die Prismen Temperatur ist aber nicht bekannt, denn das Thermometer J zeigt die Temperatur der Luft in der Prismenbuchse, aber nicht die der Prismen an, die nur sehr langsam einer Temperaturänderung folgen. HARTMANN¹ hat nun gezeigt, daß ein dem Abkühlungsgesetz folgender Körper stets sehr nahe diejenige Temperatur besitzt, welche in der umgebenden Luft $1/\gamma$ Minuten vorher geherrscht hat. γ ist die Konstante des NEWTONSchen Abkühlungsgesetzes, sie kennzeichnet die Geschwindigkeit, mit der ein Instrument einer gegebenen Temperaturschwankung folgt. Für den Spektrographen III des Potsdamer Observatoriums hat HARTMANN gefunden $1/\gamma = 92$. Danach werden sich die Prismen sehr nahe auf der Lufttemperatur befinden, die etwa $1\frac{1}{2}$ Stunde früher beim Apparate herrschte. Letztere wird an einem neben dem Spektrographen angebrachten Thermographen entnommen. Man konnte übrigens die Prismen Temperatur auch durch ein mit den Prismen selbst verbundenes Thermoelement messen.

21 Der Thermostat von J S PLASKETT Heizeinrichtungen, welche der oben beschriebenen ähnlich sind, haben sich überall fast stets bewährt. Bei sehr starkem Temperaturabfall hat aber PLASKETT² in Ottawa mehrfach gefunden, daß die Temperatur in der Prismenbuchse während weniger Beobachtungsstunden um fast einen halben Grad fiel, obwohl die Temperatur im Heizkasten stationär blieb. Nach PLASKETT ist dieser Temperaturabfall eine Folge der Wärmeleitung in den metallischen Teilen des Spektrographen, welche der freien Luft und dadurch rascher und starker Abkühlung ausgesetzt sind, d. h. in dem nicht im Heizkasten befindlichen oberen Teile des Spektrographen und in dem Spaltkopf. J S PLASKETT hat, durch diese Beobachtung veranlaßt, dem Ausbau der Heizeinrichtung des Victoria-Spektrographen ganz besondere Aufmerksamkeit gewidmet, um eine wirkliche, dauernde Temperaturkonstanz im Spektrographen zu erreichen. Nach dem Vorgang von D GILL³ versah er dieses Instrument mit einem „CALENDAR regulator and recorder“ der Cambridge Scientific Instrument Co., welcher nicht nur die Temperatur konstant hält, sondern sie auch laufend aufzeichnet. Eine Beschreibung dieses ziemlich komplizierten In-

¹ Z f Instrk 17, S 14 (1897)

² J Can R A S 16, S 91 (1922)

³ Description of the Cape Observatory, Part. II, S 28, Tafeln 13, 14, 15 1913

strumentes ist von GILL gegeben, und auch PLASKETT¹ schildert die etwas einfachere Ausführung des in Victoria verwendeten, auf welche hier nur verwiesen werden kann. Im Prinzip ist dieser Apparat ein Widerstandsthermometer. Ein feiner Platindraht, der infolge der sich ändernden Temperatur seinen Widerstand gegen den elektrischen Strom ändert, wird an Stelle des Quecksilberkontaktes benutzt. Als Vorteil betrachtet PLASKETT, daß dieser feine Draht sehr viel schneller auf Temperaturänderungen anspricht als die relativ große Quecksilbermenge des Thermometers, d. h. er besitzt eine wesentlich geringere thermische Trägheit. Da der Draht ziemlich lang genommen werden kann, läßt er sich an die verschiedenen Teile des Spektrographen führen. So liegt er bei dem Victoria-Instrument zum Teil in der Nähe der Heizdrähte, zum Teil in der Prismenbuchse selbst, wodurch die Temperatur des ganzen Spektrographen gleichmäßiger gehalten werden kann, als wenn die Regulierung der Temperatur nur von einer Stelle aus erfolgt. PLASKETT gibt an, daß sich der CALLENDAR regulator and recorder bestens bewährt hat. Da der Apparat nicht nur die Temperatur reguliert, sondern sie auch fortlaufend aufzeichnet, kann man aus den Registrierkurven ersehen, ob er dauernd richtig funktioniert hat und in welcher Temperatur der Spektrograph sich während der Beobachtungszeit befunden hat.

22 Literaturangaben über Thermostaten und Temperaturregler. An folgenden Stellen finden sich weitere Angaben über Thermostaten und Thermostatenregulatoren:

ADAMS, Ap J 35, S 167 (1921), CAMPBELL, ebenda 11, S 259 (1900), H. DARWIN, ebenda 20, S 347 (1904), DESLANDRES, B A 15, S 49 (1898), FROST, Ap J 15, S 11 (1902), GILL, Description of the Cape Observatory, Part II, S 28ff 1913, HARIMANN, Ap J 15, S 172 (1902), LORD, ebenda 8, S 65 (1898), PLASKETT, J Can R A S 16, S 91 (1922), Publ Dom Astrophys Obs Victoria, 1, S 88 u 92 (1922), SIPHFR, Ap J 20, S 7 (1904), WRIGHT, Publ Lick Obs 9, S 54 (1907).

23 Die Einrichtung zum Einstellen und Halten des Sternes auf dem Spalt. **Allgemeines.** Als Radialgeschwindigkeitsbestimmungen heller Sterne von mehreren Observatorien vorlagen, fanden sich bei der Vergleichung der von den verschiedenen Beobachtern erhaltenen Werte eines jeden einzelnen Sternes größere Differenzen, als nach der inneren Genauigkeit der Messungen erwartet werden konnte. Es zeigte sich, daß diese Differenzen systematischer Natur waren, derart, daß alle Radialgeschwindigkeiten, die auf dem einen Observatorium bestimmt waren, in gleichem Sinn und nahe in gleichem Betrag von den entsprechenden eines anderen Observatoriums abwichen. Diese Differenzen konnten weder von optischen Mängeln des Spektrographen, noch von Biegungen, noch von schlechter Temperaturregulierung herrühren, da Kontrollaufnahmen des Mondes und der Planeten genau die Radialgeschwindigkeiten ergaben, die nach der Theorie dieser Himmelskörper vorhanden sein mußte. Man erkannte dann (Ziff 10), daß Fehler in den Radialgeschwindigkeiten entstehen müssen, wenn der Spektrographenspalt nicht durch die Mitte des vom Fernrohr gelieferten Sternbildchens hindurchgeht, sei es nun, daß bei der Einstellung des Sterns auf den Spalt ein Fehler in dieser Beziehung gemacht (Einstellfehler) oder aber daß die an sich richtige Einstellung während der langen Dauer der Beobachtung nicht unverändert beibehalten worden war (Haltefehler).

Diese Fehler hängen zunächst von der verwendeten Spaltbreite ab, d. h. sie sind um so größer, je weiter der Spalt geöffnet wird. Sie sind ferner bei gleicher Spaltöffnung für Apparate geringer Dispersion größer als für solche großer Dispersion, und schließlich sind sie noch, auch wenn ein und derselbe Spektro-

¹ J Can R A S 16, S 91 (1922) Tafel 1, S 96

graph mit unveränderter Spaltweite verwendet wird, von der Persönlichkeit des Beobachters abhängig. Letztere Art von Fehler ist eine persönliche Gleichung des Beobachters, deren Größe selbst für den einzelnen Beobachter nicht konstant zu sein braucht, sondern zeitlich oder auch je nach dem benutzten Fernrohr und Spektrographen und je nach der Helligkeit des aufzunehmenden Sternes variiert. Im Wesen ist diese persönliche Gleichung ganz identisch mit der, welche sich bei Meridianbeobachtungen bemerkbar macht (Ziff 34).

24. Ältere Verfahren Wenn der Einstell- und der Haltefehler eben wegen seiner Abhängigkeit vom Beobachter sich wohl kaum ganz beseitigen läßt, so muß man doch darauf bedacht sein, ihn wenigstens in seiner Größe möglichst herabzumindern, indem man Einstell- und Haltevorrichtungen benutzt, die es ermöglichen, die Lage des vom Fernrohr erzeugten Sternbildchens auf dem Spalt möglichst gut und bequem beobachten und evtl korrigieren zu können. Ein solches Verfahren besteht darin, daß man das von der ersten Prismenfläche reflektierte Bild des im Spalte erscheinenden Sterns mit einem kleinen Fernrohr betrachtet. Wie Abb 16 des Potsdamer Spektrographen III zeigt, kann zu diesem Zweck das kleine Beobachtungsrohr *F* in die Buchse *C* gesteckt werden. Ist der Stern genügend hell, so kann auch das durch das erste Prisma erzeugte, von der ersten Fläche des zweiten Prismas reflektierte Spektrum beobachtet werden, wie die Abbildung gleichfalls zeigt. Dieses Verfahren ist früher fast ganz allgemein lange Zeit hindurch benutzt worden, z. B. in Potsdam, Lick, Pulkowa usw. Bei sehr großer Sorgfalt hat es befriedigende Resultate ergeben. Es setzt ein großes, lichtstarkes Fernrohr voraus, da sonst das durch den Spalt geschwächte, vom Prisma reflektierte Licht auch bei hellen Sternen zu geringer Intensität besitzt. Der Spalt darf nicht zu eng genommen werden, damit Beugungserscheinungen das Bild des Spaltes und des Sternes nicht so stark verändern, daß das Einstellen und Halten unsicher oder gar ungenau wird. Bei großer Unruhe des Sternbildes werden diese beiden Operationen auch bei den üblichen Spaltbreiten schwierig und vielfach ungenau. Das Verfahren strengt die Augen, wenn schwächere Sterne beobachtet werden, sehr erheblich an und führt bald zu einer Ermüdung derselben.

Eine zweite Methode, die aber nur dann anwendbar ist, wenn ein Doppelfernrohr, d. h. wenn neben dem den Spektrographen tragenden Fernrohr noch ein genügend starkes Leitrohr vorhanden ist, wie z. B. bei einigen Himmelskartenrefraktoren, ist auch mehrfach praktisch verwendet worden. Die Einstellung geschieht bei dieser Methode folgendermaßen. Während ein Beobachter vor Beginn der Aufnahme das Sternspektrum mit einer passenden Lupe betrachtet und durch Bewegung der Deklinationsfeinbewegung den Stern so auf den Spalt führt, daß das Spektrum möglichst hell erscheint, stellt ein zweiter Beobachter das Fadenmikrometer des Leitrohres so ein, daß der Stern biseziert wird. Während der ganzen Dauer der Exposition wird dann der Stern in der gleichen Stellung auf dem Mikrometerfaden gehalten. Diese Methode ist zwar bequemer als die erste, aber ungenauer, da der Beobachter sich bei der Einstellung mit der Lupe durch eine Schätzung der Helligkeit leiten lassen muß, was an sich etwas unsicher ist, namentlich bei wechselnder Luftunruhe, aber selbst wenn die Einstellung fehlerfrei erfolgt ist, kann bei längeren Belichtungen ein Haltefehler entstehen, einmal durch die Abhängigkeit der Refraktion von der Wellenlänge und zweitens durch differentielle Biegung der zwei Fernrohre gegeneinander. Aufnahmen ein und desselben Sterns zeigen größere Differenzen in den Werten der Radialgeschwindigkeit als bei Verwendung der ersten Methode.

25. Verfahren von HUGGINS Man ist daher ganz allgemein zu einer dritten Methode übergegangen, die von HUGGINS bereits 1880 im Prinzip und 1893 ge-

nau in der Form der heutigen Anwendung angegeben und benutzt worden, somit die älteste und nach den heutigen Erfahrungen trotzdem die beste Methode ist¹ HUGGINS ließ die Spaltbacken aus Spiegelmetall herstellen und hochglanzpolieren, so daß sie wie ein Spiegel reflektieren. Diese Spaltbacken wurden nun aber nicht senkrecht zur optischen Achse des Fernrohrs gestellt, sondern sie erhielten eine kleine Neigung (2° bis 5°) gegen diese. Das von ihnen reflek-

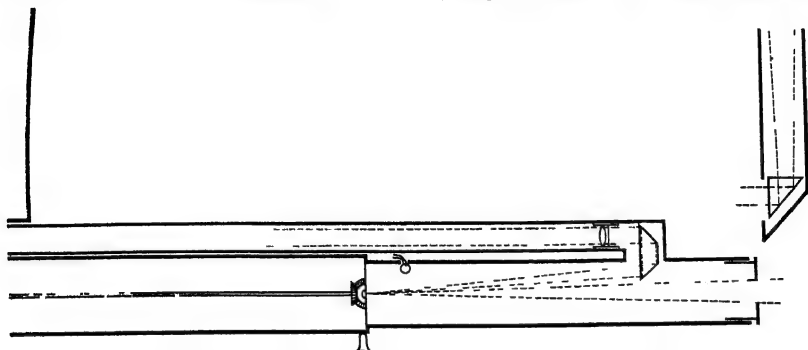


Abb 19a Haltevorrichtung von HUGGINS (Spaltteil)

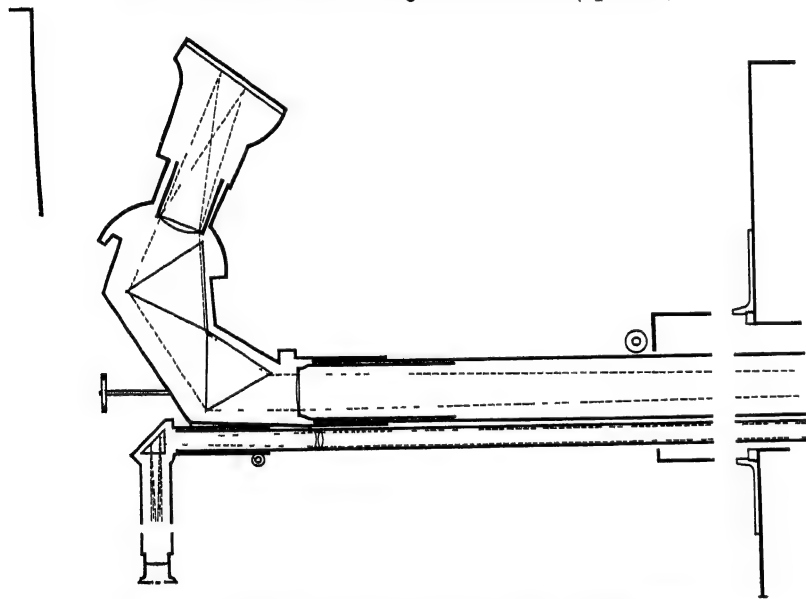


Abb 19b Haltevorrichtung von HUGGINS (Kamerateil)

tierte Licht wurde durch ein seitlich angebrachtes, in einiger Entfernung vom Spaltkopfe befindliches Prisma aufgefangen, um nahezu 180° abgelenkt, danach durch ein achromatisches Objektiv, in dessen Brennpunkt sich der Spalt befindet, parallel gemacht und dann durch ein kleines, für den Beobachter bequem zugängliches Fernrohr wieder zu einem Bild vereinigt. Der Beobachter sieht somit den Spalt und das auf ihn durch das Hauptfernrohr projizierte Bild des Sternes und kann somit den Stern leicht richtig auf den Spalt bringen und ihn in dieser Stellung während der ganzen Belichtung halten. Abb 19a, 19b gibt

¹ Publ William Huggins Obs 2, S 12ff u 16ff (1909)

die Zeichnung des Apparates, den HUGGINS für den Ultraviolett-spektrographen seines Tulse Hill-Reflektors konstruiert hat, in so klarer Weise, daß eine weitere Erläuterung nicht nötig ist¹. Die Methode von HUGGINS ist, wie die praktischen Erfahrungen zeigen, den beiden anderen erheblich überlegen. Besonders günstige Resultate ergibt sie, wenn der Spektrograph an einem photographisch korrigierten Refraktor angebracht wird. Beim Hineinsehen in das Haltefernrohr sieht man die Spaltbacken erleuchtet durch die nicht durch das Objektiv vereinigten Strahlen und auf dem Spalt selbst das kleine blaue Sternscheibchen, welches durch das photographisch achromatisierte Objektiv erzeugt wird. Es läßt sich leicht in eine richtige Stellung auf den Spalt bringen. Das Objektiv wirkt ähnlich wie ein Farbenfilter. Der Haltefehler infolge der Farbenabhängigkeit der Refraktion wird auf ein Minimum reduziert.

Bei Reflektoren liegen die Verhältnisse in dieser Beziehung wesentlich ungünstiger. Eine besondere Haltevorrichtung hat E. B. FROST für den BRUCE-Spektrographen konstruiert. Im Prinzip ist die HUGGINSSCHE Anordnung beibehalten worden. Durch Drehen eines zusätzlichen Spiegels kann aber auch das von der ersten Prismenfläche reflektierte Bild des Spaltes betrachtet werden. Auf diese Weise können beide Haltemethoden je nach Beheben angewendet werden².

f) Die Optik einiger besonders bekannter Spektrographen.

26 Die Optik des zweiten MILLS-Spektrographen [Publ Lick Obs 9, Pt 3 (1907)]

Durchmesser des großen Spiegels		92,9 cm
Durchmesser des kleinen Spiegels		24,2 „
Brennweite des großen Spiegels		533 „
Distanz zwischen den beiden Spiegeln		394 „
Distanz des Brennpunktes des großen Spiegels von dem kleinen Spiegel		140 „
Distanz des kleinen Spiegels vom Brennpunkt des Systems		442 „
Aquivalentbrennweite		16,9 m
Kollimator { Öffnung 5 cm (auf 4,29 cm abgeblendet)		
{ Brennweite 80 cm		
Prismen (Jena O 102) Kantenlänge 49 mm, Seitenlänge	82 mm	
	„ 51 „ „	89 „
	„ 51 „ „	97 „
Brechender Winkel	$63^{\circ}28'$	
Kamera { lange { Öffnung 6,3 cm,		
{ Brennweite 54 cm,		
{ kurze { Öffnung 6,3 cm,		
{ Brennweite 40 cm		

27 Die Optik des Victoria-Spektrographen [Publ Dom Astrophys Obs Victoria 1, Nr 1 (1922), J Can R A S 14, S 177 (1920)]

Durchmesser des großen Spiegels	1,84 m
Brennweite des großen Spiegels	9,18 „
Durchmesser des kleinen Spiegels	0,49 „
Brennweite des kleinen Spiegels	3,01 „
Distanz zwischen den beiden Spiegeln	6,98 „
Aquivalentbrennweite	32,9 „
Kollimator (regular Brashear triplet)	Durchmesser 63 mm, Brennweite 1143 mm

¹ Publ William Huggins Obs 2, S 23 (1909)

² Ap J 15, S 8 (1902)

² P. GUTHNICK, Der Einprismenspektrograph der Sternwarte Berlin-Babelsberg
Sitzber Preuß Akad Math Phys Kl 1930 I, S 3

W H WRIGHT, The Quartz Spectrograph of the Lick Observatory Lick Bull 9, S 52 (1917), Description of the Instruments and Methods of the D O Mills Expedition Publ Lick Obs 9, Pt 3, S 25 (1907)

g) Systematische Fehler bei der Aufnahme von Spektren

Bei der Aufnahme und Auswertung von Sternspektrogrammen werden, wie bei allen Beobachtungen und Messungen, Fehler zufälliger und systematischer Natur auftreten. Die Wirkungen der ersteren lassen sich dadurch unschädlich machen, daß nicht nur eine oder wenige Platten ein und desselben Sternes aufgenommen und ausgemessen werden (einmal oder auch mehrmals), sondern eine große Zahl Platten und jede Platte mehrmals gemessen wird. Diese Art von Fehlern ist, wie auch sonst überall, von geringer Bedeutung für die Spektralbeobachtungen, hingegen können systematische Fehler in sehr erheblichem Maße den Wert der Beobachtungen herabdrücken. Es ist deshalb von großer Wichtigkeit, die verschiedenen Arten von systematischen Fehlern bei Spektralmessungen, ihre Ursachen und die Abhelfemittel gegen sie zu kennen. Deshalb soll hier ausführlich auf diese Fehler eingegangen werden.

30 Optische Mangel des Spektrographen Die erste Quelle für das Auftreten dieser Fehler sind Mängel im optischen System des Spektrographen. Zonenfehler, Astigmatismus und starke Krümmung des Bildfeldes der Linsen, Krümmungen der Prismenflächen, Ungleichmäßigkeiten (z B Schlieren) in dem Glase der Prismen selbst. Bei den modernen Apparaten ist das Vorhandensein solcher Mängel kaum wahrscheinlich, da die optischen Werkstätten heutzutage über zahlreiche und wirksame Mittel und Wege verfügen, die zu liefernden Linsen und Prismen auf Fehler zu prüfen und vorhandene Fehler fortzuschaffen (s Bd I, Abschnitt 2). Trotzdem wird es gut sein, einen neuen Spektrographen in bezug auf die Güte der optischen Teile zu prüfen, ehe man ihn zur Bestimmung von Radialbewegungen verwendet, zumal eine solche Prüfung in einfacher und wenig zeitraubender Weise geschehen kann. Größere Mängel des optischen Systems wird man schon dadurch finden, daß man von dem Emissionsspektrum eines Elementes, das scharfe Spektrallinien besitzt, unter Zuhilfenahme der Spaltblende zwei Aufnahmen auf dieselbe Platte macht, von denen die eine kurz, die zweite aber lang belichtet wird. Sind Fehler vorhanden, so werden die Linien des lang belichteten Spektrums Verschiebungen gegen die des kurzbelichteten aufweisen. Ein besseres Verfahren, welches auch quantitative Resultate gibt, ist von CORNU und später von HARTMANN¹ in erweiterter und wesentlich verbesserter Form angegeben worden. Es ist zweifellos das genaueste, erfordert aber mehr Zeit und Arbeit als das erstere. Man wird es daher erst dann anwenden, wenn das erste Verfahren einen Verdacht auf optische Mängel aufkommen läßt. HARTMANN setzt auf das Kollimatorobjektiv eine Blende mit einem rechteckigen, zur brechenden Kante des Prismas parallelen Schlitz von einigen Millimeter Breite und von einer Höhe, die dem Durchmesser des Objektivs entspricht. Es bleibt hierdurch nur ein bestimmt definierter Teil des optischen Systems frei, z B der eine Randteil. Nun wird ein Emissionsspektrum (etwa Eisen) photographiert, hierauf die Blende entfernt und durch eine zweite ersetzt, die einen ebensolchen Schlitz besitzt, der aber nur die zentralen Teile des Systems freiläßt (Zentralblende). Unter Anwendung der Spaltblende wird wiederum eine Aufnahme gemacht, und diese wird eine Verschiebung des Spektrums gegen das der ersten Aufnahme zeigen, falls optische Fehler vorhanden sind, der Betrag dieser Verschiebung ergibt ein Urteil über die Größe des

¹ Z f Instrk 20, S 17 u 47 (1900), Ap J 11, S 400 (1900), 12, S 430 (1900)

Fehlers, und der Abstand des Blendenschlitzes von der Mitte der Zentralblende ergibt den Ort, wo der Fehler im optischen System ist. Indem man das aus dem Kollimator austretende Strahlenbündel durch verschiedene Blenden in einzelne Abschnitte zerlegt und durch Aufnahmen die Verschiebung der durch die verschiedenen Abschnitte erhaltenen Spektra gegen das durch die Zentralblende erhaltene Spektrum mißt, kann man die Fehler des ganzen optischen Systems finden. Dieses Verfahren setzt freilich voraus, daß der Fokus der Kameralinse genau bestimmt und die Platte genau in ihn eingestellt ist. Ob diese Bedingung erfüllt ist oder nicht, ersieht man aus den Aufnahmen selbst. Zeigen nämlich die Spektra, welche durch die Mitte des optischen Systems aufgenommen sind (Zentralblende), eine Verschiebung gegen die Spektra, die durch die seitlichen Teile des Systems erhalten wurden, so können zwei Fälle eintreten. Entweder zeigt sich in den Verschiebungen ein gleichmäßig fortschreitender Gang, so daß das Spektrum der einen Randpartie gegen das der Mitte etwa nach längeren Wellenlangen, das der anderen Randpartien aber nach kürzeren Wellenlangen verschoben ist, dies ist das Anzeichen, daß die Platte nicht im richtigen Fokus stand. Sind dagegen Verschiebungen der beiden Randpartien gegen die Mitte nach derselben Richtung vorhanden, so liegen Fehler des optischen Teiles vor. Der Grund für diese Regel ist von selbst einleuchtend. HARTMANN fand beispielsweise für einen Einprismenspektrographen folgende Verschiebungen

Erster Rand	+0,040 mm
	+0,014
	0,000
Mitte	0,000
	+0,003
	+0,020
Zweiter Rand	+0,050

Da diese Verschiebungen das gleiche Vorzeichen haben (sie liegen alle in der Richtung nach den kürzeren Wellenlangen), so können bei keiner Fokussierung alle Strahlen zu einem scharfen Bilde vereinigt werden. Bei der darauffolgenden Prüfung der einzelnen optischen Teile zeigte sich, daß das Prisma fehlerhaft war und durch ein neues ersetzt werden mußte. Für die Anwendung dieses Verfahrens ist es von Wichtigkeit, daß der ganze Spektrograph in thermischem Gleichgewicht ist, damit nicht Änderungen in den optischen und mechanischen Teilen des Apparates in der Zeit zwischen den einzelnen Aufnahmen eintreten, zumal wenn diese Zwischenzeit nicht sehr kurz ist. Bei nicht vorhandenem thermischen Gleichgewicht können aber auch dadurch unscharfe Spektra entstehen, daß die optischen Teile, besonders die Prismen nicht mehr als homogene Glasmassen angesehen werden können, wie sie es in thermischem Gleichgewicht wirklich sind.

Sind durch eines dieser Verfahren Mängel im optischen System nachgewiesen, so hat man nun zu suchen, welcher Teil des Systems dafür verantwortlich zu machen ist. Es sind die Objektive und Prismen einzeln zu untersuchen, und der fehlerhafte Teil muß verbessert oder, wenn dies nicht möglich ist, durch einen neuen ersetzt werden. Hier kann nicht näher auf die Methoden der Einzeluntersuchung eingegangen werden, sondern es sei auf den zweiten Abschnitt dieses Bandes verwiesen oder auf folgende Schriften: A. CORNU, Sur le spectre normal du soleil, partie ultraviolette. II. Partie. Ann. École Norm., II. Série, 9, S. 21 (1880), J. HARTMANN, Bemerkungen über den Bau und die Justierung von Spektrographen. Zf. Instr. 20, S. 17, 47 (1900), G. EBERHARD, Untersuchungen über den Spektrographen IV des Astrophysikalischen Observatoriums

Potsdam Publ 18, Nr 54 (1907) [hier ist ein Beispiel für die Untersuchung eines Spektrographen in voller Ausführlichkeit gegeben]

31 Falscher Fokus Ist die photographische Platte nicht im Fokus des Kameraobjektives, so entsteht eine Unschärfe der Spektrallinien, die Linien werden, wenn man von einem kleinen Bezirke um die optische Achse des Kameraobjektivs herum absieht, nicht symmetrisch verbreitert, sondern einseitig. Da nun das Spektrum der Vergleichslichtquelle Emissionslinien, das des Sternes Absorptionslinien besitzt, wirkt sich ein falscher Fokus bei den Linien des ersteren anders aus als bei den Sternlinien. Diese unsymmetrische Unschärfe nimmt Beträge an, die von der Intensität der Linien abhängen. Eine sehr schwache Emissionslinie nämlich erleidet keine oder eine nur geringe Verschiebung, eine starke hingegen größere Verschiebungen. Im Sternspektrum selbst können schwache Linien ganz verschwinden, stärkere werden geschwächt und verschoben, ganz starke noch weiter verschoben. Der Betrag der Verschiebungen ist nicht identisch mit dem einer verschobenen Emissionslinie. Bereits beim Messen macht sich eine Unsicherheit bemerkbar, die schon allein zu systematischen Fehlern führen kann und auch meist führen wird. Ist die photographische Platte zur optischen Achse geneigt, so treten bei unrichtigem Fokus noch größere Fehler auf. Beispielsweise macht sich bei einem Chromaten nach HARTMANN oder SCHWARZSCHILD von etwa 30 cm Brennweite schon eine falsche Fokaleinstellung von 0,2 mm sehr bemerkbar, die verschiedenen Sternlinien ergeben verschiedene Radialgeschwindigkeiten, und der Mittelwert aus ihnen ist um Beträge von einigen Kilometern verfälscht. Es ist daher von größter Wichtigkeit, die Bestimmung und richtige Einstellung des Fokus für die verschiedenen Temperaturen, bei welchen der Spektrograph gebraucht wird, mit sehr großer Sorgfalt auszuführen. Die einfachste Methode besteht darin, daß man eine große Reihe Sonnenspektren bei verschiedenen Einstellungen, in ziemlich engen Intervallen, aufnimmt. Die richtige Fokaleinstellung ist dann die, bei der die Trennung dicht beieinander liegender Spektrallinien am besten ist. Der Gebrauch feinkorniger Platten erleichtert die Auswahl unter den Platten und steigert die Genauigkeit in erheblichem Maße. Die geringe Empfindlichkeit dieser Plattensorten bietet den weiteren Vorteil, daß man trotz der großen Intensität des Sonnenlichtes die richtige Expositionszeit leicht finden kann. Falsche Belichtungen verschlechtern das Aussehen des Sonnenspektrums stark und geben bei der Auswahl der besten Platten zu Tauschungen Anlaß.

Besitzt die Kamera eine Einrichtung, die Plattenneigung zu verändern, so erhält man genauere Bestimmungen, wenn man die Plattenneigung möglichst groß macht. Das Gebiet der scharfen Linien wird dann in den Spektrogrammen verkleinert und die Auswahl der günstigsten Einstellung dadurch wesentlich einfacher und sicherer.

Statt des Sonnenspektrums kann man sich für die Fokussierung auch eines Emissionsspektrums mit zahlreichen scharfen Linien bedienen, erfahrungsgemäß sind die Resultate aber weniger genau als bei Benutzung des Sonnenspektrums.

Eine andere Methode, den richtigen Fokus zu finden, hat HARTMANN angegeben. Sie ist aber nur anwendbar, wenn das optische System fehlerfrei ist. Setzt man vor das Kollimatorobjektiv eine Blende mit zwei Schlitz (parallel zur brechenden Kante des Prismas), die genügend seitlich von der optischen Achse und symmetrisch zu ihr sind, und macht dann je eine extrafokale und intrafokale Aufnahme eines Emissionsspektrums mit scharfen Linien, etwa unter Benutzung der Spaltblende, auf dieselbe Platte, so erhält man zwei Spektren, in denen jede Linie doppelt ist. Durch Ausmessung der Distanzen dieser beiden Linien sowohl auf den extrafokalen wie auf den intrafokalen Auf-

nahmen berechnet sich dann unter Anwendung der Skalenangaben bei beiden Einstellungen der richtige Fokus für eine jede Spektrallinie und damit eine eventuelle Krümmung des Gesichtsfeldes und die Neigung der Platte gegen die optische Achse. Ist die Bildfläche keine Ebene, sondern eine gekrümmte Fläche, so kann auf diese Weise auch diejenige Neigung der Platte gefunden werden, bei der die Platte ein möglichst großes Stück des Spektrums scharf abbildet.

Fokalbestimmungen sind für die verschiedenen Temperaturen auszuführen, unter denen der Spektrograph gebraucht wird, und zwar für Temperaturen von etwa 5° zu 5° oder in noch engeren Temperaturintervallen, falls die Lage des Fokus sich als sehr temperaturempfindlich erweist. Sind die Einzellinsen der beiden Spektrographenobjektive verkittet, so ist es erwünscht, von Zeit zu Zeit eine Fokalbestimmung zu wiederholen zur Kontrolle, ob sich etwa der Fokus infolge Eintrocknens des Kanadabalsams zwischen den Einzellinsen im Laufe der Zeit geändert hat und Deformationen der Linsen hierdurch eingetreten sind¹.

Für den Spektrographen IV des Potsdamer Observatoriums, der eine Kamera von 35 cm Brennweite besitzt, ergab sich beispielsweise folgende Temperaturabhängigkeit des Fokus

t	f	
10°C	31,86 mm	
-- 5	,87	Bei sehr hohen und besonders bei abnorm tiefen Temperaturen (unter -10°C) war überhaupt kein sicherer Fokus zu erhalten, das ganze optische System war zu stark deformiert
0	,86	
+ 5	,80	
+10	,67	
+15	,48	
+20	,27	
+25	,04	

32. Temperaturänderungen während der Aufnahme Sehr große, systematisch verlaufende Fehler treten auf, wenn sich die Temperatur des Spektrographen während der Aufnahme ändert. In der folgenden Tabelle sind einige Beispiele von Änderungen der Radialgeschwindigkeit für eine Temperaturänderung von 1°C gegeben, aus denen man ersehen kann, wie stark ein Spektrograph auf eine Temperaturänderung zu reagieren pflegt.

Spektrograph	Prisma	f v pro 1°C	Quelle
D des Potsdamer Observatoriums	1	+19 km	Z f Instrk 26, S 315 (1901)
III „ „ „	3	+15	
A „ „ „	2 Compound	+17	
IV „ „ „	3	+17	
			Potsdam Publ 18, Nr 54, S 80 (1908)
Des Iack-Observatory	1	+36	Lick Bull 3, S 25 (1904)

Die Änderung der Radialgeschwindigkeit infolge von Temperaturänderungen setzt sich aus zwei Teilen zusammen: Änderungen im optischen System einerseits und Änderungen in den mechanischen Teilen andererseits, beide überlagern sich. Die ersteren Verschiebungen sind durch Änderungen des Brechungsindex, insbesondere der Prismen, veranlaßt und hängen von der Glassorte ab. So sind sie kleiner bei Crown Glas als bei Flint Glas. Die sich überlagernden anderen Verschiebungen entstehen durch die thermische Ausdehnung der Metallteile des Apparates. Man kann im voraus nie wissen, wie sich ein Spektrograph infolge des Zusammenwirkens dieser beiden Einflüsse verhält. Beispielsweise erhielt HARIMANN² für die verschiedenen Wellenlängen bei dem Spektrographen I (ein

¹ Z f Instrk 23, S 274 (1903).

² Z f Instrk 21, S 315 (1901)

Prisma) des Potsdamer Observatoriums folgende Änderungen Δv der Radialgeschwindigkeit bei einer Temperaturänderung von 1°C

λ	Δv	λ	Δv	λ	Δv	λ	Δv
3800	+4,5 km	4200	+0,6 km	4500	-2,7 km	4800	-5,9 km
3900	+3,5	4300	-0,6	4600	-3,8	4900	-7,0
4000	+2,6	4400	-1,6	4700	-4,8	5000	-8,0
4100	+1,7						

Es zeigt sich somit ein sehr stark ausgesprochener Gang für die einzelnen Wellenlängen, während der Spektrograph III (drei Prismen) wohl auch einen systematischen Gang, aber von sehr geringer Größe, aufweist,

λ	Spektrograph III Δv	Spektrograph A Δv
4100	+15,5 km	+17,0 km
4200	+15,4	+17,2
4300	+15,2	+17,4
4400	+15,0	+17,6
4500	+14,8	+17,8

ebenso wie der Spektrograph A (zwei Compoundprismen)

Auf jeden Fall ersieht man aus diesen Zahlen, daß große, systematisch verlaufende Fehler bei Temperaturänderungen während einer Spektralaufnahme entstehen können, und daß es folglich absolut nötig ist, den Apparat auf konstanter Temperatur zu halten. Glücklicherweise läßt sich diese Forderung durch Einschließen des gesamten Apparates in einen auf elektrischem Wege heizbaren Kasten leicht erfüllen, und kein moderner Spektrograph dürfte mehr ohne einen solchen verwendet werden, wenn es sich um Aufnahmen handelt, die länger als wenige Minuten dauern. Immerhin bieten sich auch dann noch gewisse Schwierigkeiten. An Tagen mit starker Sonnenstrahlung wird die Lufttemperatur in der das Instrument enthaltenden Kuppel stark ansteigen, und dieser Anstieg wird sich, wenn auch verringert und in der Phase verschoben, auch im Spektrographen vollziehen. Bei Beginn der Beobachtungen ist der Spektrograph meist noch nicht in thermischem Gleichgewicht, sondern es wird die thermische Bewegung noch fortbestehen, auch wenn man den Apparat durch Inbetriebsetzung der elektrischen Heizung konstant auf der Temperatur hält, die die Thermometer bei Beginn der Beobachtung anzeigen. Da die Beobachtungen meist abends beginnen, wo die Temperatur sowohl der Kuppel als auch die des Spektrographen absinkt, werden alle Aufnahmen nach einer Seite hin systematisch gefälscht. Das beste wäre, wenn man den Spektrographen dauernd auf ein und denselben Temperatur halten und damit verhindern könnte, daß er seinen taglichen Temperaturverlauf vollzieht. Das hat aber große Schwierigkeiten und ist infolgedessen wohl auch noch kaum durchgeführt worden. Im allgemeinen werden diese Fehler nicht bedeutend sein. Näheres über den Verlauf der Temperatur in einem Spektrographen in bezug auf den Temperaturverlauf in der Kuppel ist weiter oben bereits mitgeteilt worden.

33 Biegung Bei der Besprechung der Bedingungen, die ein Astrospektrograph zu erfüllen hat, war auch die erwähnt, daß seine mechanische Stabilität besonders groß sein muß, d. h. daß keine Biegung innerhalb des Spektrographen selbst vorhanden sein darf, weil er in allen Lagen zur Vertikalen gebraucht wird. Man hat wohl ohne Zweifel von Anfang an darauf geachtet, daß diese Bedingung erfüllt ist, aber eigentliche Untersuchungen über die Biegung eines Astrospektro-

graphen sind kaum bekannt geworden KEELER¹, DESLANDRES², HARTMANN³ geben an, daß die Biegung in ihren Instrumenten unmerklich klein sei, dagegen fand KUSTNER⁴ für den Bonner Spektrographen einen recht hohen Wert für die stündliche Linienverschiebung durch Biegungsänderung, der selbst in den gewöhnlichen Gebrauchslagen 6,9 km/sec erreicht Es kommt nämlich für die Aufnahme von Sternspektren nicht auf die Biegung selbst, sondern nur auf ihre Änderung mit dem Stundenwinkel bei konstanter Deklination an, d. h. die Größe der Biegung an sich ist für die Beobachtungen gleichgültig, wenn sie nur möglichst konstant bleibt und sich nicht mit dem Stundenwinkel ändert Die Änderung der Biegung ist nun, wie leicht einzusehen, nicht proportional der Zeit Denkt man sich die Lage α einer Spektrallinie als Funktion der Zeit infolge der Biegungsänderung, gezählt von der Mitte der Exposition an, durch eine Potenzreihe dargestellt

$$\alpha = a + bt + ct^2 + dt^3 + \dots,$$

so hat der Faktor c infolge der Biegung merkliche mit dem Stundenwinkel der Aufnahme systematisch wechselnde Beträge Kopiert man das Vergleichsspektrum am Anfang und Ende der Exposition auf oder nur in der Mitte, so entstehen systematische Fehler in den Werten der Radialgeschwindigkeiten

Da auch der Potsdamer Spektrograph IV in den Radialgeschwindigkeiten häufig beobachteter Sterne mit konstanter Radialbewegung systematische Gänge aufwies, die vom Stundenwinkel abhängen, so ist dieser Apparat experimentell gründlich durchuntersucht worden⁵ Diese Arbeit verlief so, daß für einen gewissen Deklinationsgrad Aufnahmen des Eisenspektrums beim Stundenwinkel $t = 0^h$ und bei den zu untersuchenden anderen Stundenwinkeln t_n auf dieselbe Platte unter Anwendung der Spaltblende gemacht wurden In der folgenden Tabelle ist die Differenz der Biegung zwischen dem Stundenwinkel t_n und dem

Stundenwinkel	Biegungsdifferenz				
	$\delta = 0^\circ$	$\delta = 20^\circ$	$\delta = 50^\circ$	$\delta = 80^\circ$	$\delta = 90^\circ$
-12 ^h	-0 ^R ,0016	-0 ^R ,0106	-0 ^R ,0236	-0 ^R ,0246	
11	-0,0032	-0,0107			
10	-0,0020	-0,0074	-192		
9		-0,0048	-111	-0,0126	
8	-0,0003		-69		
6	+0,0004	-0,0007	-36	-0,0061	
5			-14		
4	+0,0018	+0,0013	+6		
3			+5	+0,0009	
2	+0,0039	+0,0022	+5	+0,0006	
-1			+27		
+1			-3		
2	+0,0010	-0,0004	+3		
3				-0,0012	-0 ^R ,0024
4	+0,0024	-0,0016	-32		
6	-0,0012	-0,0049	-76	-0,0122	-0,0125
8	+0,0011		-152		
9		-0,0134		-0,0222	-0,0254
10	-0,0029	-0,0144	-236	-0,0268	-0,0278
11	-0,0023	-0,0148		-0,0264	-0,0288
12	-0,0018	-0,0128	-227	-0,0243	-0,0281
13	-0,0023	-0,0133	-208		
+14		-0,0119	-0,0199	-0,0201	-0,0266

¹ Publ Lick Obs 3, S 180 (1894) ² BA 15, S 55 (1898)

³ A N 155, S 118 (1901) ⁴ A N 166, S 204 (1904) ⁵ Z f Instak 30, S 29 (1910)

Stundenwinkel $t = 0^h$ für die Deklinationen $\delta = 0^\circ, 20^\circ, 50^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ gegeben. Die Zahlen beziehen sich auf die Spektralgegend um $\lambda 4300$ herum und sind in Revolutionen der Meßschraube $1^R = 0,5^{mm}$, entsprechend einer Radialbewegung von 555 km/sec angegeben. Das negative Vorzeichen deutet an, daß das bei dem Stundenwinkel t_n aufgenommene Spektrum gegen das bei $t = 0^h$ erhaltene nach der Richtung der größeren Wellenlangen (nach Rot) verschoben ist. Alle Aufnahmen sind in der Fernrohrlage „Achse voran“ gemacht.

Eine graphische Darstellung dieser Messungen zeigt, daß die Biegungskurven für verschiedene Deklinationen große Ähnlichkeiten besitzen. Das Minimum liegt bei $t = -1^h$, die Maxima bei -13^h und $+14^h$. Die Kurven sind symmetrisch zu der durch -1^h gehenden Achse.

Das Maximum der Biegung zeigt natürlich eine starke Abhängigkeit von der Deklination, es wächst mit zunehmender nördlicher Deklination. Dieses Maximum läßt sich durch die Formel

$$-0^R,0304 \sin(9^\circ,5 + \delta)$$

darstellen. Setzt man $\theta = 11^h - t$, so läßt sich beispielsweise die Biegungskurve b für $\delta = 50^\circ$ durch folgende trigonometrische Reihe darstellen:

$$\begin{aligned} b = & -0^R,0083 - 0^R,0119 \cos \theta - 0^R,0034 \cos 2\theta - 0^R,0010 \cos 3\theta \\ & + 0,0001 \cos 4\theta + 0,0003 \cos 5\theta + \\ & + 0,0002 \sin \theta \end{aligned}$$

Wichtig ist natürlich die Frage, in welchen Stundenwinkeln die Beobachtungen am wenigsten unter der Biegung leiden. Die stündliche Änderung der Biegung als Funktion des Stundenwinkels ist für $\delta = 50^\circ$ durch die wenig konvergente, aber die Beobachtungen gut darstellende Formel

$$\begin{aligned} & + 0^R,0001 - 0^R,0003 \cos \theta - 0^R,0009 \cos 2\theta - 0^R,0009 \cos 3\theta \\ & - 0,0003 \cos 4\theta + 0,0009 \cos 5\theta + 0,0005 \cos 6\theta \\ & - 0,0033 \sin \theta - 0,0018 \sin 2\theta - 0,0004 \sin 3\theta \\ & + 0,0007 \sin 4\theta + 0,0007 \sin 5\theta \end{aligned}$$

gegeben.

Es ist weiter versucht worden, für konstanten Stundenwinkel ($t = 0^h$) die Biegungsdifferenz Biegung bei $z = z_n^\circ$ minus Biegung bei $z = 0^\circ$, d. h. die Abhängigkeit der Biegung von der Zenitdistanz z allein zu bestimmen. Diese Differenz ließ sich ebenfalls durch eine trigonometrische Reihe

$$+ 0^R,001 - 0^R,0019 \sin z + 0^R,0043 \sin 3z - 0^R,0017 \sin 5z$$

darstellen.

Die innere Biegung, die durch Bewegungen im System Spalt, Kollimator, Prismen, Kamera, Platte entsteht, verursacht ein Unschärfwerden der Spektrallinien. Da der Stern Absorptionslinien, das Vergleichsspektrum Emissionslinien hat, wirkt sich das Unschärfwerden der Linien im Sternspektrum in anderer Weise aus als im Vergleichsspektrum, und hierdurch entsteht ein systematischer Fehler. Es läßt sich nicht leicht übersehen, wie und in welchem Betrage eine innere Biegung die Radialgeschwindigkeit beeinflusst, um so mehr, als das Unschärfwerden starker Emissionslinien nicht das gleiche ist wie das schwächer, und genau dasselbe gilt auch für die Absorptionslinien des Sterns, hier noch abhängig von der wirklichen Scharfe dieser Linien.

Einen Teil der durch die Biegung im Apparat selbst erzeugten Fehler hat man durch eine geeignete zeitliche Verteilung des Vergleichsspektrums unschädlich zu machen versucht, und dies ist gewiß auch bis zu einem gewissen Grade gelungen. Man sah aber doch ein, daß es besser sei, den Spektrographen

selbst so stabil zu bauen, daß Störungen durch Biegung überhaupt nicht mehr zu befürchten sind. Alle modernen Spektrographen durften kaum noch systematische Fehler infolge von innerer Biegung haben. Immerhin wird es gut sein, ehe man einen neuen Apparat in Benutzung nimmt, ihn auf das Vorhandensein von Biegung im Laboratorium zu prüfen, indem man ein Emissionsspektrum in den zwei extremen Lagen aufnimmt, in welchen die relative Biegung ein Maximum haben mußte.

34 Systematische Fehler infolge der Biegung des Fernrohrs selbst Bei Radialgeschwindigkeitsbestimmungen mit dem zweiten MILLS-Spektrographen zeigte sich, daß die Radialgeschwindigkeit eines Sterns verschieden ausfiel, je nachdem das Fernrohr (36-Zoller des Lick-Observatoriums) während der Aufnahme eine östliche oder westliche Lage gegen den das Fernrohr tragenden Pfeiler hatte. Diese Differenz war nicht unbeträchtlich, beispielsweise erreichte sie den Wert von $-0,88$ km für fünf Objekte, deren mittlere Zenitdistanz 64° war. Auch bei Radialgeschwindigkeitsbestimmungen an Planeten war sie vorhanden, so daß sie nicht durch einen Einstellfehler verursacht sein konnte. Ihre Größe hing von der Zenitdistanz ab in dem Sinne, daß sie im Meridian am kleinsten war und mit wachsender Zenitdistanz gleichfalls wuchs. Auch die Spaltweite beeinflusste die Größe dieser Differenz. Eine eingehende Untersuchung zeigte, daß eine starke Biegung des Rohres des 36-Zollers die Ursache dieser Anomalie war, die Achsen von Fernrohr und Kollimator fielen nicht in allen Lagen des Fernrohrs zusammen, sondern sie bildeten einen von der Lage des Fernrohrs abhängigen Winkel miteinander. Waren die optischen Teile des Spektrographen völlig fehlerfrei, so konnte natürlich eine solche Biegung des Teleskoprohrs nur einen Lichtverlust erzeugen, aber keine derartigen von der Lage des Fernrohrs abhängigen Fehler. Das ist aber offenbar nicht der Fall gewesen. TH. S. JACOBSEN¹ hat diesen Fehler für den zweiten MILLS-Spektrographen, wenn er am 36-Zoller verwendet wurde, genau untersucht.

Die Biegung des Teleskopes hängt ab vom Sinus der Zenitdistanz, und die Verschiebung des Sternspektriums infolge dieser Biegung senkrecht zum Spalt ist proportional der Komponente der Biegung in dieser Richtung. Diese Komponente f der Biegung senkrecht zum Spalt in einer beliebigen Lage des Teleskopes ist gegeben durch die Gleichung

$$f = f_0 \sin z \cos q = f_0 (\cos \delta \sin \varphi - \sin \delta \cos \varphi \cos t),$$

da der Spalt des Spektrographen parallel zum Äquator ist.

Es bedeutet in dieser Gleichung f_0 den Maximalbetrag des Biegungseffektes für eine bestimmte Spaltweite, d. h. f_0 ist der Effekt für den Fall, daß das Teleskop im Meridian liegt, östlich vom Fernrohrpfeiler, und nach dem Südpunkt des Horizontes gerichtet ist. Liegt das Fernrohr westlich vom Pfeiler, so erhält f_0 das negative Vorzeichen. Weiterhin sind

- z die Zenitdistanz des Sterns,
- q der parallaktische Winkel des Sterns,
- φ die Breite des Beobachters,
- δ die Deklination des Sterns,
- t der Stundenwinkel des Sterns.

Der Biegungseffekt ist Null für alle Punkte des Himmels, welche auf der Kurve $\sin z \cos q = 0$ liegen. Diese Kurve ist der Ort der Punkte, wo die Deklinationkreise die Vertikalkreise rechtwinklig schneiden. Daß obige Gleichung eine gute Darstellung der Verhältnisse gibt, zeigte sich dadurch, daß die wahrscheinlichen Fehler sich bei ihrer Anwendung stark verminderten.

¹ Lick Bull. 12, S. 138 (1926), Publ. Lick Obs. 16, S. XXVf (1928).

Die Konstante f_0 der Formel bestimmt sich dadurch, daß eine jede Beobachtung eine Gleichung

$$f_0 = f \operatorname{cosec} z \sec q$$

liefert. Es wird also f_0 am besten gefunden durch Beobachtung von Sternen in möglichst großer Zenitdistanz nahe dem Meridian.

Wie oben erwähnt, spielt aber auch die Spaltbreite eine Rolle, f_0 ist von der Spaltbreite s abhängig. JACOBSEN fand für den zweiten MILLS-Spektrographen, wenn er am 36 Zolligen Refraktor benutzt wird

$$f_0 = -0,375 \cdot s \text{ km/sec,}$$

wenn s in tausendstel Zoll gemessen ist.

Im allgemeinen wird dieser systematische Fehler (Kollimationsfehler) bei modernen Spektrographen nur selten in höherem Betrage zu finden sein, da man gelernt hat, die optischen Teile sehr genau auf Fehler zu untersuchen, und falls sich Mängel finden, sie wohl stets gegen fehlerfreie austauscht. Auch dürfte die Biegung des eigentlichen Fernrohrs nicht mehr so hohe Beträge erreichen, da die Rohre jetzt weit stabiler gebaut werden und sie bei Spiegeln wenigstens (Cassegrain) fast stets eine geringere Länge besitzen.

Auf jeden Fall ist es leicht, zu prüfen, ob ein derartiger Fehler vorhanden ist, man braucht nur Spektrogramme heller Sterne in großer Zenitdistanz in beiden Lagen des Fernrohrs aufzunehmen und nachzusehen, ob die Radialgeschwindigkeit sich mit der Lage des Fernrohrs ändert.

35 Einstell- und Haltefehler. Ein weiterer systematischer Fehler ist der sog. Einstell- bzw. Haltefehler (Guiding error). Das Vergleichsspektrum wird so aufkopiert, daß man als Lichtquelle eine durch eine Bogenlampe oder einen elektrischen Funken beleuchtete, mattierte Glasscheibe oder Milchglasplatte benutzt, so daß der Spalt des Spektrographen gleichmäßig erleuchtet ist. Beim Ausmessen des Vergleichsspektrums ist somit alles auf die Mitte der Emissionslinien des Vergleichsspektrums, also auf die Mitte des gleichmäßig erleuchteten Spaltes bezogen. Ist das Sternspektrum so aufgenommen, daß die Mitte des Sternbildchens in der Mitte des Spaltes liegt, so ist der Spalt ebenfalls gleichmäßig beleuchtet, und man erhält einen richtigen Wert der Radialgeschwindigkeit, indem beide Lichtquellen als in der Mitte des Spaltes, d. h. als an derselben Stelle des Spaltes befindlich angenommen werden können. Diese Verhältnisse ändern sich aber sofort, wenn der Stern etwas seitlich im Spalte steht, d. h. näher der einen Kante ist als der anderen, der Spalt ist dann durch den Stern nicht mehr gleichmäßig erleuchtet. Es ist natürlich, daß dann die Radialgeschwindigkeit des Sterns fehlerhaft gefunden werden muß, zu groß oder zu klein, je nachdem der Stern bei der Aufnahme näher der einen oder der anderen Kante stand. Unter Umständen ist das Kollimatorobjektiv dann ebenfalls nicht mehr gleichmäßig erleuchtet, und falls dieses oder überhaupt das optische System Mängel hat, kommt noch ein weiterer Fehler in die Radialgeschwindigkeit hinein. Hier sei angenommen, daß das optische System fehlerfrei sei, um die prinzipielle Bedeutung des Haltefehlers besser hervortreten zu lassen.

Bei den älteren Einrichtungen der Spektrographen stellte man meist den Stern so ein, daß man vor der Aufnahme mittels einer Lupe, die an Stelle der photographischen Platte eingesetzt wurde, das Sternspektrum beobachtete und mittels der Feinbewegung der Deklinationsachse dann den Stern so auf den Spalt brachte, daß sein Spektrum in möglichst großer Helligkeit erschien. Das war besonders bei unruhiger Luft eine delikate Operation, die nicht immer so glückte, daß das Sternbildchen nun auch wirklich sich in der Mitte des Spaltes befand, d. h. ihn gleichmäßig erleuchtete, wie es sein sollte. Es galt zwar als Regel, den

Spalt enger zu machen, als der Durchmesser des Sternbildes war, z B für einen Sternbilddurchmesser von 0,05 mm den Spalt höchstens 0,03 mm weit zu machen. Trotz dieser Regel war aber das Sternbildchen nicht immer mit Sicherheit so auf die Mitte des Spaltes zu bringen, daß der Spalt als gleichmäßig beleuchtet angesehen werden konnte, wie er es doch bei der Aufnahme des Vergleichsspektrums tatsächlich ist, denn bei unruhiger Luft läßt es sich kaum ausführen, den Schwerpunkt des Sternbildchens oder Sternscheibchens ganz genau in die Mitte des Spaltes zu bringen, auch wenn letzterer noch viel enger ist, als der Durchmesser dieses Scheibchens beträgt. Die großen Abweichungen, die zwischen den in den ersten Zeiten der Sternspektrographie erhaltenen Werten der Radialgeschwindigkeiten vorhanden waren, durften zum größten Teil auf den Einstellfehler oder besser gesagt auf den Einstell- und den Haltefehler zurückzuführen sein. Merkwürdigerweise wurde man auf die Möglichkeit des Vorkommens dieses Fehlers erst sehr spät aufmerksam, obwohl er doch ziemlich große numerische Beträge erreichen kann. Es ist wohl erst KUSTNER¹, der sich desselben bewußt wurde, denn er sagt „An exact test of the observed radial velocities of stars can in my opinion be obtained only by the observation of a source of light of precisely known radial velocity and as similar as possible to a star, under conditions as closely possible the same in the observation of the star“. Er schlägt dann für große, lichtstarke Instrumente vor, die Radialgeschwindigkeiten der hellsten kleinen Planeten oder der Jupiteisatelliten zu bestimmen und mit den theoretisch genau bekannten Werten der Geschwindigkeiten zu vergleichen. Er diskutiert auch noch andere Möglichkeiten, bis er schließlich mit ZURHELLEN isolierte, leuchtende Bergspitzen in der Nachtseite des Mondes, nahe dem Terminator, spektrographisch aufnahm. Auf diese Weise fand er, daß die in Bonn beobachteten Radialgeschwindigkeiten der Sterne um rund -1 km/sec zu korrigieren seien. Merkwürdigerweise ist diese Anregung KUSTNERS lange unbeachtet geblieben, und erst 1915 wurde W W CAMPBELL² bei Beobachtungen der Venus auf diese Ursache des Vorkommens systematischer Fehler aufmerksam. Er erkannte ebenfalls, daß eine nicht gleichförmige, sondern asymmetrische Erleuchtung des Spaltes derartige Fehler erzeugen könne, und er führte aus, daß systematische Fehler auch in den Radialgeschwindigkeiten der Sterne auf die Weise entstehen konnten, daß der Beobachter beim Führen des Sternes die Tendenz hat, die Mitte des Sternscheibchens näher der einen Kante des Spaltes zu halten als der anderen. Der Einstell- und der Haltefehler waren, wie schon erwähnt, besonders zu befürchten, als man noch nicht die Einrichtung für das Einstellen und Halten des Sterns auf dem Spalt besaß, die heutzutage bei jedem modernen Instrument vorhanden ist, und die die Möglichkeit bietet, die Lage des Sternscheibchens auf dem Spektrographenspalt selbst zu beobachten. Aber auch nach dieser Vervollkommenung der Instrumente können noch solche systematische Fehler vorkommen, wenn auch vielleicht nicht mehr in so beträchtlicher Größe.

Wegen des großen Einflusses, den ein Einstell- bzw Haltefehler auf die Radialgeschwindigkeitsbestimmung ausüben kann, sollen die Ursachen für seine Entstehung näher betrachtet werden, die auch noch für die neueren Apparate gelten.

Zunächst liegt die Möglichkeit vor, daß der Beobachter das Sternscheibchen vor der Beobachtung selbst nicht richtig auf die Spaltöffnung bringt. Solche physiologischen oder psychologischen Eigentümlichkeiten sind schon bei Messungen anderer Art bemerkt worden, und es wird von ihnen weiter unten bei der Besprechung der Ausmessung der Spektren noch die Rede sein. Es mag nur

¹ Ap J 27, S 323 (1908)

² Publ A S P 27, S 129 (1915)

erwähnt werden, daß solche Fehler gesetzmäßigen, von Person zu Person wechselnden Charakter und Größenbetrag haben und häufig für lange Zeiten in konstanter Form erhalten bleiben

Eine unrichtige, unsymmetrische Einstellung kann aber auch durch einen Zentrierungsfehler des Objektives des Fernrohrs, an dem der Spektrograph befestigt ist, entstehen, nur daß hier der Einstellungsfehler meist konstant bleibt. Durch eine schlechte und wie es scheint sogar veränderliche Zentrierung der Korrektionslinse des großen Refraktors in Pulkowa haben die dort bestimmten Radialgeschwindigkeiten systematische Fehler erhalten, wie BELOPOLSKY¹ nachwies. Fehler derselben Art, wenn wohl auch von geringerem Betrage, entstehen, wenn das Fernrohrobjektiv selbst fehlerhaft ist und in der Lichtverteilung nicht ganz gleichmäßige Scheibchen als Bilder der Sterne gibt.

Ist der Stern zu Beginn der Exposition in die richtige Lage auf den Spalt gebracht, so kann ein Haltefehler in die Radialgeschwindigkeit kommen, wenn die Führung des Sterns unachtsam erfolgt, die Refraktion und die atmosphärische Dispersion sich während der Belichtung ändern durch Veränderung der Zenitdistanz des Sterns oder wenn infolge unrichtiger Aufstellung des Fernrohrs selbst der Stern seine Lage gegen die Spaltmitte ändert.

Aus dem vorher Angeführten ergibt sich, daß man dem Einstell- und dem Haltefehler (Fehler der Führung) große Aufmerksamkeit zuwenden muß. Es sollte jeder Beobachter Versuche wie KUSTNER anstellen und weiterhin prüfen, ob ein Gang entsprechend dem Stundenwinkel in den Radialgeschwindigkeitswerten eines möglichst häufig beobachteten Sternes sich zeigt.

36 Einstell- und Haltefehler infolge der atmosphärischen Dispersion
Das Bild eines Sternes ist infolge der atmosphärischen Dispersion weder ein Punkt noch ein Scheibchen, in welchem das Licht der verschiedenen Wellenlangen symmetrisch zur Mitte des Gebildes verteilt ist, sondern ein kleines Spektrum, dessen Ausdehnung von der Zenitdistanz des Sterns abhängig ist. Das Spektrum ist bei großer Zenitdistanz länger als bei kleiner, d. h. die Ausdehnung des Spektrums ist für einen gegebenen Beobachtungsort abhängig von der Deklination und dem Stundenwinkel des Sterns. Sie ist am geringsten beim Meridiandurchgang und wächst mit zunehmendem östlichen bzw. westlichen Stundenwinkel. Wird der Stern durch das optische System des Fernrohrs auf den Spalt projiziert und wird sein Bild mittels einer Haltevorrichtung (kleines Fernrohr oder Mikroskop) so auf den Spalt justiert und auf ihm gehalten, daß dem Auge das von den spiegelnden Spaltbacken reflektierte Bild symmetrisch zur Mitte des Spaltes erscheint, so wird hauptsächlich das Wellenlängengebiet des atmosphärischen Sternspektrums richtig auf die Spaltmitte fallen, für das das Auge am empfindlichsten ist, d. h. das Gebiet um $550\ \mu\mu$ herum. Das durch den Spektrographen erhaltene Spektrum wird somit für das Gebiet um $550\ \mu\mu$ richtige Wellenlangen bzw. Radialgeschwindigkeiten ergeben, während die Wellenlängengebiete zu beiden Seiten von $550\ \mu\mu$, als nicht in der Mitte des Spaltes liegend, systematische Abweichungen zeigen müssen, die um so größer werden, je weiter ab von $550\ \mu\mu$ die Wellenlängengebiete liegen, vorausgesetzt, daß der Spalt eine solche Breite hat, daß die betreffenden Wellenlängengebiete des atmosphärischen Sternspektrums überhaupt noch in den Spektrographen hineingelangen. Die aus einem Spektrogramm erhaltenen Radialgeschwindigkeiten werden also einen von der Wellenlänge abhängigen Gang aufweisen, der einen Hinweis für das Vorhandensein eines solchen Haltefehlers ist, falls der Spektrograph fehlerfrei ist.

¹ Ap J 21, S 55 (1905)

Besonders leicht werden diese systematischen Abweichungen auftreten, wenn als Aufnahmeterrnrohr ein Spiegelteleskop benutzt wird, und sie werden um so größer sein, je größer die Brennweite des Spiegelsystems ist. Bei Benutzung eines Objektivs, das meist nur für einen beschränkten Wellenlängenbereich achromatisch ist, wirkt das Objektiv etwa wie ein Filter: man erhält denjenigen Teil des atmosphärischen Sternspektrums in richtiger Lage auf dem Spalte, für welchen das Objektiv achromatisiert ist, der also für das Auge der hellste ist. Die Zerstreuungsscheibchen der von dem achromatisierten Bereiche weiter abliegenden Gebiete werden groß und damit auch schwach. Ist z. B. das Objektiv für den Wellenlängenbezirk λ 400 bis 450 $\mu\mu$ achromatisiert, so sieht der Beobachter bei richtiger Einstellung des Spektrographenspaltes in den Fokus des Fernrohrs ein kleines blaues Scheibchen auf dem Spalte, das sich leicht in die richtige Lage zum Spalt bringen und in dieser halten läßt. Die Spektrogramme ergeben richtige Radialgeschwindigkeiten für den Wellenlängenbezirk λ 400 bis 450 $\mu\mu$, aber bei Vorhandensein atmosphärischer Dispersion systematisch fehlerhafte für weiter abliegende Bezirke wie etwa für λ 350 bis 390 $\mu\mu$. Diese Abweichungen werden um so größer werden, je weiter ab der Wellenlängenbezirk von dem der Achromatisierung abliegt, für den man den Stern auf den Spalt justiert und hält. Je weiter der Spalt geöffnet wird, um so größer sind diese Abweichungen.

Da, wie bereits erwähnt, die Länge des atmosphärischen Sternspektrums sowohl von der Deklination wie von dem Stundenwinkel des Sterns abhängt und außerdem dieses Spektrum seine Lage gegen die Spalttrichtung und den Spalt selbst ändert, so wird man eine veränderliche Radialgeschwindigkeit erhalten, wenn man eine größere Reihe von Spektren ein und desselben Sterns während einer Nacht in verschiedenen Stundenwinkeln aufnimmt. Die so erhaltene Radialgeschwindigkeit wird sich dann als Funktion des Stundenwinkels darstellen lassen, vorausgesetzt daß der Stern eine konstante oder eine so langsame veränderliche Radialgeschwindigkeit besitzt, daß sie als konstant für einen Tag angesehen werden kann.

Die Abhängigkeit der Radialgeschwindigkeit vom Stundenwinkel ist somit ein Anzeichen dafür, daß ein Einstell- oder Haltefehler vorliegt. Bei Vorhandensein einer größeren Anzahl von Spektrogrammen eines einzelnen Sternes sollte man diese stets nach dem Stundenwinkel ordnen und prüfen, ob eine Abhängigkeit zwischen Radialgeschwindigkeit und Stundenwinkel vorhanden ist. Freilich wird es nicht immer leicht sein, diese Abhängigkeit mit Sicherheit festzustellen, da der Zustand der Atmosphäre, insbesondere die Luftunruhe, den Betrag des systematischen Fehlers mehr oder minder beeinflussen kann.

Da die atmosphärische Dispersion für einen gegebenen Beobachtungsort auch von der Deklination des Sterns abhängt, so können die Radialgeschwindigkeiten auch noch einen systematischen, von der Deklination der Sterne abhängigen Fehler aufweisen, der sich dem von dem Stundenwinkel abhängigen Fehler überlagert. Dieser Fehler wird sich insbesondere bei der Vergleichung zweier Kataloge von Radialgeschwindigkeiten bemerkbar machen, in welchen eine genügend große Zahl gemeinsamer Sterne verschiedener Deklination vorhanden ist, vorausgesetzt daß die beiden Observatorien, auf denen die Kataloge gewonnen wurden, eine merklich verschiedene geographische Breite besitzen. Man erfaßt den Stundenwinkel- und den Deklinationsfehler zusammen, wenn man die Abhängigkeit der Radialgeschwindigkeiten von der Zenitdistanz der Sterne zu der gegebenen Beobachtungszeit prüft.

Der Haltefehler, der durch die atmosphärische Dispersion entsteht, hängt aber auch noch von der Helligkeit und dem Spektraltypus der Sterne ab. Der

Wellenlangenbezug, der bei einem hellen Stern noch wirksam für das Auge und die photographische Platte ist, ist größer als bei einem schwachen Stern, er ist auch größer für einen B- oder A-Stern als für einen gleich hellen vom Typus G bis M. Somit entstehen durch diese Art des Haltefehlers auch noch systematische Fehler der Radialgeschwindigkeiten, die von der Helligkeit und dem Spektraltypus abhängen, so daß die atmosphärische Dispersion außerordentlich komplizierte Verhältnisse für sehr genaue Bestimmungen der Radialgeschwindigkeit schafft.

Das einfachste und sicherste Mittel, die Einstell- bzw. Haltefehler infolge atmosphärischer Dispersion zu vermeiden, besteht darin, daß man die Beobachtungen nur in sehr kleinen Zenitdistanzen ausführt. In den Fällen, wo dies nicht möglich ist, muß man auf die Aufnahme des Gesamtspektrums oder großer Teile desselben verzichten und sich auf kleinere beschränken. Die Größe dieser Teile hängt vom Betrage der Zenitdistanz ab. Je größer diese ist, um so kleinere Teile sind brauchbar. Ein Kriterium dafür, daß man den Teil nicht zu groß gewählt hat, besteht darin, daß der Betrag der Radialgeschwindigkeit eines Sterns für alle Linien der ganzen gemessenen Strecke gleichbleiben muß. Bei der Einstellung des Sterns auf den Spalt hat man darauf zu achten, daß das Licht der Spektralgegend, die vermessen werden soll, richtig auf die Mitte des Spaltes fallen muß. Das ist nicht immer leicht auszuführen. W. H. WRIGHT hat diese Operation sehr eingehend geschildert, und da seine Darstellung der ganzen Frage sehr klar ist, soll sie hier ausführlich und wortlich wiedergegeben werden. Sie bezieht sich auf das Einstellen eines Sterns auf den Spalt bei Benutzung eines Reflektors, wo die richtige Einstellung besonders schwierig wird¹. „Although a mirror forms an achromatic image, one does not have to observe very far from the zenith with a powerful reflecting telescope to notice a strong tinge of color bordering the image of a star, due to atmospheric dispersion. This effect of zenith distance is more noticeable with a reflector than with a refractor, as with the latter instrument there is always more or less color about. At a zenith distance of 25° the color is very pronounced. It becomes then a matter of importance, where the following is done with the use of a reflecting slit, to determine the position in the elongated star image at which the slit must be placed in order to allow the greatest amount of light, of the wave-length used, to enter the spectrograph. For the purpose of making such a determination the telescope was pointed at a bright star (α Hydrae) whose zenith-distance was about 25° . One observer looking into the small finding telescope kept the image of the star from drifting in right ascension, while the other looking into the spectroscope moved the telescope in declination until the brightness of the blue spectrum was at maximum. The position of the slit on the image was then noted by the first observer. In this way it was found that the brightest spectrum was resulted when the slit crossed the visually brightest part of the somewhat elongated star image. The experiments were repeated, using the star α Leonis at a zenith distance of about 45° . While the atmospheric spectrum was much more pronounced in this case, the result of the tests was about the same. As we are not accustomed to observe at zenith distances as great as that used in the second test, the practice is followed of placing the slit across the visually brightest part of the image.“

W. H. WRIGHT hat noch ein zweites Verfahren angegeben, wie man den Einstell- bzw. Haltefehler infolge atmosphärischer Dispersion vermeiden kann². Es besteht darin, daß der Spalt des Spektrographen nicht wie üblich parallel

¹ Publ. Lick Obs. 9, S. 45 (1907)

² Lick Bull. 12, S. 109 (1926)

dem Aquator gestellt wird, sondern in der Richtung des atmosphärischen Spektrums, d. h. also stets senkrecht. Auf diese Weise kann das Licht aller Wellenlängen in den Spalt eintreten. Der Spektrograph muß somit im Positionswinkel drehbar sein. Das Spektrum wird durch Hin- und Herbewegen des Fernrohrs in Richtung der Deklination verbreitert. Dieses Verfahren ist besonders für Aufnahmen im Ultraviolett, z. B. mit Hilfe eines Quarzspektrographen, geeignet. Ob es schon bei Radialgeschwindigkeits-Bestimmungen verwendet wurde, ist nicht bekannt.

37 Verziehnngen der Schicht der photographischen Platte Als letzte Quelle für systematische Fehler bei der Aufnahme von Sternspektren kommen noch Schichtverziehnngen der photographischen Platte in Betracht, freilich durften sie nur ausnahmsweise eine Rolle spielen. Eine Schichtverziehung wird meistens nur einzelne Spektrallinien und die aus ihnen folgenden Radialgeschwindigkeiten beeinflussen und damit den Mittelwert der ganzen Platte. Es ist aber nicht wahrscheinlich, daß auf einer zweiten Platte eine Schichtverziehung in demselben Sinn vorkommt, so daß die Schichtverziehung im allgemeinen nur in der Art eines zufälligen Fehlers wirken wird, außer wenn die Platten bei den photographischen Manipulationen allesamt in gleicher, unrichtiger Weise behandelt werden. Das dürfte aber wohl kaum vorkommen und ist außerdem jedenfalls vermeidbar.

h) Systematische Fehler bei der Ausmessung der Spektrogramme.

38 Fehler des Meßapparates Der eigentlich messende Teil des Apparates, die Meßschraube (bzw. der Maßstab), kann periodische und fortschreitende Fehler besitzen, deren Vernachlässigung systematische Fehler in den Radialgeschwindigkeiten zur Folge hat. Es braucht aber hier nicht näher auf diese Fehlerquelle eingegangen zu werden, da sie bei allen astronomischen Messungen eine Rolle spielt und keine Eigentümlichkeit spektroskopischer Messungen ist. Es werden die Fehler der Schraube ermittelt und an die Messungen angebracht genau in der Weise wie bei anderen astronomischen Arbeiten. Die fortschreitenden Fehler werden übrigens zum großen Teil durch Benutzung eines linienreichen Vergleichsspektrums unschädlich gemacht.

Es ist wohl selbstverständlich, daß der Meßapparat in einem Raum mit konstanter Temperatur aufgestellt wird, damit thermische Änderungen der Meßschraube oder anderer Teile des Apparates während der Messung vermieden werden.

Großes Gewicht ist darauf zu legen, daß die Beleuchtungsvorrichtung richtig und in fester Lage gegen das Meßmikroskop angebracht ist. Die optischen Teile des Apparates, speziell die Mikroskopobjektive, sind selten fehlerfrei, so daß durch eine Veränderung der Lage der Beleuchtungslampe während der Messung systematische Fehler in den Messungen entstehen. Bei feststehendem Mikroskop und beweglicher Platte ist es daher am zweckmäßigsten, die Beleuchtungsvorrichtung, etwa eine mattierte Metallfadenlampe, fest mit dem Mikroskop zu verbinden, so daß Lagenänderungen überhaupt nicht vorkommen können. Den besten Ort für die Lampe findet man dadurch, daß man das Okular des Mikroskopes entfernt und das Auge in den Brennpunkt des Objektivsystems bringt. Erscheint letzteres dann als gleichmäßig erleuchtete Scheibe, so ist die beste Stellung der Lampe gefunden, in der sie dann ein für allemal befestigt wird.

39 Die Linienkrümmung¹ Das Abbild des geradlinigen Spaltes auf der photographischen Platte, eine Spektrallinie, ist beim Prismenspektrographen

¹ J. HARTMANN, A. N. 155, S. 98 (1901)

eine Parabel, deren konkave Seite in der Richtung nach kürzeren Wellenlängen hin liegt. Das Sternspektrum, das zwischen den Vergleichsspektren aufgenommen wird, liegt im Scheitel der Parabel oder in der Nahe desselben, besitzt infolge der Linienkrümmung also eine Verschiebung gegen die beiden außen liegenden Vergleichsspektren. Letztere müssen durch eine Korrektur auf das Sternspektrum bezogen werden, so daß diese Verschiebung des Sternspektrums gegen die Vergleichsspektren aufgehoben wird. Die Korrektur ist meist nicht sehr groß, wenn der Spalt richtig gegen das Prismensystem steht, hat aber einen systematischen Charakter und kann daher nicht vernachlässigt werden. Daher soll hier etwas näher auf die Bestimmung der Linienkrümmung eingegangen werden. Es sei vorausgesetzt, daß die Spektren in einem Meßapparat vermessen werden, der es gestattet, rechtwinklige Koordinaten zu messen. Die Platte wird zunächst im Meßapparat so justiert, daß das Sternspektrum parallel zur Meßschraube liegt. Es seien x_1 und y_1 , x_3 und y_3 die rechtwinkligen Koordinaten der Mitten der Vergleichsspektren. Dann ist

$$y_0 = \frac{y_1 + y_3}{2}$$

die Ordinate der Mitte zwischen diesen beiden gemessenen Punkten und $y_3 - y_0 = y_0 - y_1 = D$ ist der Abstand der Punkte y_1 und y_3 von der Mitte der Vergleichsspektren. Der Ordinate y_0 entspricht eine Abszisse x_0 .

Die Mitte des Sternspektrums besitze die Koordinaten x_2 und y_2 , dann ist $y_2 - y_0 = d$ der Abstand der Mitte des Sternspektrums von der Mitte der Vergleichsspektren. Ist das Sternspektrum bei der Exposition richtig in die Mitte der Vergleichsspektren gekommen, so ist $y_2 - y_0 = d = 0$. Das wird im allgemeinen wohl selten in Strenge erreicht werden. Steht der Spalt senkrecht auf der Mittellinie des Spektrums und ebenso auch der Meßfaden, so ist bekanntlich die Gleichung einer Spektrallinie

$$x - x_0 = a(y - y_0)^2,$$

worin $x_0 = \frac{x_1 + x_3}{2}$ und y_0 die Koordinaten des Parabelscheitels sind.

Diese beiden Bedingungen, besonders die erstere, werden aber meistens nicht erfüllt sein, und es gilt dann die allgemeine Gleichung

$$x - x_0 = a(y - y_0)^2 + b(y - y_0), \quad (1)$$

wo a eine Konstante ist, die allein von den optischen Verhältnissen des Spektrographen und der Wellenlänge abhängt, während die Konstante b durch die Stellung des Spaltes und die Neigung des Meßfadens gegen die Mittellinie des Spektrums bestimmt wird. Für die Mitten der Linien des Vergleichsspektrums gelten dann die Gleichungen

$$\left. \begin{aligned} x_1 - x_0 &= aD^2 - bD, \\ x_3 - x_0 &= aD^2 + bD, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

somit

$$b = \frac{x_3 - x_1}{2D} \quad (3)$$

Für das Sternspektrum ist

$$x_2 - x_0 = ad^2 + bd = -\Delta x, \quad (4)$$

wenn mit $-\Delta x$ die an die Messungen der Abszissen des Vergleichsspektrums anzubringende Korrektur bezeichnet wird. Aus (2) und (4) folgt für diese Korrektur

$$-\Delta x = a(d - D)^2 + bd \quad (5)$$

Fällt die Mitte des Sternspektrums mit der Mitte der Vergleichsspektren zusammen ($y_2 - y_0 = d = 0$), d. h. werden die Einstellungen auf die Vergleichsspektren genau symmetrisch auf beiden Seiten des Sternspektrums ausgeführt, so folgt für die Korrektion

$$\Delta\lambda = aD^2 \quad (6)$$

Es ist in diesem Fall somit gleichgültig, ob die Spektrallinien und der Meßfaden senkrecht auf der Richtung des Sternspektrums stehen, auch können die drei Spektren beliebig weit seitwärts im Spalte, d. h. auf einem Arm der Parabel liegen, wenn nur das Sternspektrum symmetrisch zwischen den gemessenen Punkten der Vergleichsspektren gemessen wird. Diese Bedingung wird stets erfüllbar sein, da die Vergleichsspektren ziemlich lange Linien besitzen und man bei der Messung diejenigen Punkte in den beiden Vergleichsspektren wählt, die gleichweit von dem Sternspektrum entfernt sind. In dem Fall, daß eine solche Auswahl aber nicht möglich ist, muß die Korrektion aus der allgemeinen Formel (5) berechnet werden.

Zur Bestimmung der Konstante a der Formel (6) stellt man auf einer Linie der Vergleichsspektren eine Anzahl von Punkten x_n, y_n für äquidistante Werte von y ein und berechnet a aus diesen symmetrisch zur Mitte liegenden Einstellungen unter Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate.

Wie schon erwähnt, ist die Konstante a eine Funktion a_λ der Wellenlängen. Man hat daher a_λ für eine Reihe von Wellenlängen λ zu bestimmen. Es zeigt nun die Erfahrung, daß diese verschiedenen Werte a_λ sich als eine lineare Funktion der Abszissen x_λ bzw. der Schraubenablesung s_λ darstellen lassen. Beispielsweise ist für den Spektrographen IV des Potsdamer Observatoriums¹

$$a_\lambda = +0^R,0190 + 0,000098 (s_\lambda - 21^R,36),$$

wo s_λ der Wert von x_λ für die gemessene Spektrallinie ist, $1 R$ der Meßschraube beträgt 0,5 mm. Ist die Konstante a_λ genügend genau bestimmt, so berechnet man mittels ihres Wertes eine Tafel für die Korrekturen, die an die Schraubenablesungen der Sternlinien anzubringen sind, um das Sternspektrum auf das Vergleichsspektrum reduziert zu erhalten. Folgende Tafel gilt für den Spektrographen IV.

$2D$	$R=0$	$R=20$	$R=30$	$R=40$	$R=60$
0,20 mm	0 ^R ,0002	0 ^R ,002	0 ^R ,002	0 ^R ,002	0 ^R ,002
,30	4	4	5	5	5
,40	7	8	8	8	9
,50	11	12	12	13	14
,60	15	17	18	19	20
,70	20	23	24	25	27
,80	27	30	32	33	36
,90	34	38	40	42	45
1,00	42	47	50	52	57

Unter $2D$ ist der gegenseitige Abstand der zwei symmetrisch zum Sternspektrum gelegenen Punkte der Vergleichsspektren oder der doppelte Abstand der zu vermessenden Stelle des Sternspektrums von dem Vergleichsspektrum zu verstehen. Die Tabelle ist so zu verwenden, daß man die Zahlen derselben positiv zu den Schraubenablesungen der Sternlinien hinzuzufügen hat, um das Sternspektrum auf das Vergleichsspektrum reduziert zu erhalten. Der Ablesung $R = 21^R,36$ entspricht die Wellenlänge $\lambda = 4308$. Auch die Konstante b ist von der Wellenlänge abhängig, so daß man bei der Benutzung der allgemeinen

¹ Potsdam Publ 18, Nr 54, S 68 (1907)

Formel (5) auch b als Funktion der Wellenlänge bzw der Schraubenablesung s_λ anzusetzen hat ($b = -0^R,0103 - 0,000037 s_\lambda$). Man kann diese Formel übrigens vereinfachen, wenn man beim Ausmessen der Spektren den Meßfaden so dreht, daß $x_3 - x_1 = 0$ wird. Es fällt dann das zweite Glied der Formel (5) weg.

Bei Spektrographen, die nicht genügend stabil gebaut sind, so daß sich die Spalttrichtung gegen die Richtung der brechenden Kante der Prismen verändert, wird b auch von der Lage des Spektrographen abhängen, während die Konstante a stets unverändert bleibt, wenn nichts an den optischen Teilen des Spektrographen geändert wird. Auch aus diesem Grunde ist es zweckmäßig, die Aufnahme und die Vermessung der Spektrogramme so anzuordnen, daß man die Formel (6) verwenden kann.

40 Der Einstellungsfehler Beim Ausmessen der Spektrogramme können schließlich noch systematische Fehler psychologischer Art begangen werden dadurch, daß der Meßfaden nicht genau auf die Mitte einer Spektrallinie eingestellt wird, sondern unwillkürlich ein wenig seitlich. Dieser Fehler zeigt eine Abhängigkeit von der Breite der Spektrallinie in der Weise, daß sein Betrag für breite Linien größer als für schmale ist. HARIMANN¹ hat diese Art von Fehlern untersucht und gefunden, daß die Abhängigkeit des Fehlers f von der Breite l der Linie sich durch einen Zweig einer Hyperbel

$$l^2 = af^2 + b/f$$

darstellen läßt (a, b sind Konstanten), und es scheint, daß diese Gesetzmäßigkeit nicht nur für seine eigenen Messungen, sondern auch für die anderer Beobachter sowohl der Form als auch wenigstens der Größenordnung nach besteht. Der Betrag selbst ist natürlich für verschiedene Beobachter nicht gleich.

Diese Art von Fehlern kommt bei astronomischen Messungen sehr häufig vor, die Helligkeitsgleichung ist z. B. ein spezieller Fall derselben. Da aber dieser Fehler nicht nur systematischen Charakter besitzt, sondern auch unter Umständen sehr merkbare Größe haben kann, sind die Messungen von vornherein so anzuordnen, daß er ganz oder wenigstens zum größten Teil eliminiert wird. Das kann dadurch geschehen, daß die Ausmessung unter Vorsetzen eines Reversionsprismas vor das Okular des Meßapparates stattfindet. Die Einstellungen werden dann zweimal ausgeführt derart, daß das Prisma bei der zweiten Messung um 90° gedreht wird, wodurch sich der Meßfaden scheinbar in einer Richtung bewegt, die der der ersten Messung entgegengesetzt ist. Ein zweites Verfahren, ohne Anwendung eines Reversionsprismas, besteht darin, daß das Spektrogramm bei der zweiten Messung umgelegt wird, so daß der Meßfaden einmal im Sinne wachsender und das zweitemal im Sinne abnehmender Wellenlänge sich bewegt. Die praktische Erfahrung hat gezeigt, daß dieses zweite Verfahren meist bessere Resultate als das erste ergibt.

Das Mittel beider Einstellungen, sowohl das nach dem ersten, als auch das nach dem zweiten Verfahren, kann als ganz oder wenigstens als nahezu fehlerfrei angesehen werden.

Auch bei der Messung der Absorptionslinien eines Sternspektrums scheint ein derartiger Fehler aufzutreten, doch ist er meist von wesentlich geringerem Betrage.

Exakte und sehr ausführliche Untersuchungen über psychologische Fehler dieser Art hat P. LABITZKE² in seiner Dissertation „Experimentelle Untersuchungen über Fehler bei Mitteeinstellungen“ veröffentlicht. Es soll auf diese wertvolle Abhandlung hingewiesen werden, die auch zahlreiche Literaturangaben enthält. Auf sie näher einzugehen, wurde hier zu weit führen.

¹ A N 155, S 95 (1901)

² Astr Mitt Sternwarte Göttingen 18 (1924)

i Verwandlung der Messungen (Schraubenablesungen) in Wellenlangen

41. Die Formel von CORNU¹ Nachdem die Ausmessung der Platte beendet ist und an die Ergebnisse die Korrekturen für Schraubenfehler, systematische Einstellungsfehler, Linienkrümmung usw. angebracht sind, handelt es sich darum, einen funktionellen Zusammenhang zwischen den durch die Messung erhaltenen Zahlenwerten (s), deren Einheit ganz beliebig sein kann (Millimeter, Schraubenumdrehung usw.) und den ihnen entsprechenden Wellenlängen (λ) herzustellen. Bei den sehr verwickelten optischen Verhältnissen eines Spektrographen ist es von vornherein nicht wahrscheinlich, daß auf theoretischem Wege eine solche Beziehung zwischen s und λ zu finden ist. Man ist daher darauf angewiesen, eine empirische Formel zu benutzen, eine Interpolationsformel, die sich den Messungen möglichst gut anschließt. Als die Messungen noch eine geringe Genauigkeit besaßen und man sich mit Wellenlangenangaben von drei bis vier Stellen begnügte, war es das nachstliegende, sich eines graphischen Reduktionsverfahrens zu bedienen, d. h. die Messungen als Abszissen, die bekannten Wellenlängen als Ordinaten in Millimeterpapier einzuzichnen und eine sich möglichst eng an die einzelnen Punkte anschließende, glatte Kurve hindurchzulegen, aus der dann die gesuchten Wellenlangenwerte entnommen werden konnten. Dieses Verfahren gab genügend genaue Werte, und es wurde sich auch heute noch, wo man für die Wellenlangen sechs- bis siebenstellige Zahlen benutzt, verwenden lassen, wenn die Interpolationskurven nicht außerordentlich große Dimensionen annehmen wurden, was nicht nur unbequem, sondern auch wenig genau ist, weil sich solche Kurven kaum mit der nötigen Sicherheit zeichnen lassen dürften. Einer graphischen Darstellung haftet weiterhin häufig eine gewisse Willkür an, so daß ein rechnerisches Verfahren vielfach schon aus diesem Grunde einem graphischen vorzuziehen ist.

CORNU¹ bemerkte nun als erster bei der Aufzeichnung einer Kurve zur Umwandlung der Messungen (s) in Wellenlängen (λ) die große Ähnlichkeit dieser Kurve mit einer gleichseitigen Hyperbel, deren Asymptoten parallel den Koordinatenachsen sind (rechtwinklige Hyperbel), und es glückte ihm der Versuch, seine Messungen s durch eine Formel

$$s - s_0 = \frac{c}{\lambda - \lambda_0} \quad (1)$$

mit hinreichender Genauigkeit darzustellen. Die Größen s_0 , λ_0 , c sind Konstanten, die aus den bekannten Wellenlängen zu bestimmen sind, und zwar bedeutet s_0 eine additive Konstante, die von der zufälligen Einlegung des Spektrums in den Meßapparat abhängt, c dagegen den Skalenwert der Platte. CORNU hat seine Formel aber ausdrücklich als eine rein empirische Interpolationsformel bezeichnet. Merkwürdigerweise ist diese Formel trotz ihrer bewiesenen guten Brauchbarkeit nach CORNU nicht mehr angewendet worden, sondern vollkommen verschollen.

42. Die Formel von HARTMANN² Es ist nun das Verdienst von HARTMANN, nicht nur auf diese Formel hingewiesen und ihre gute Brauchbarkeit von neuem durch genaue Messungen dargetan zu haben, sondern sie auch noch durch Hinzufügung einer weiteren, aus den Messungen zu bestimmenden Konstante (α) verbessert zu haben, durch welche zwar die Rechenarbeit bei der

¹ Sur le spectre normal du soleil, partie ultra-violette, II. Partie. Ann. de l'Ecole norm. sup., II. sér. 9, S. 21 (1880). Die Formel findet sich auf S. 62 ff.

² Publ. Potsdam Nr. 42 (1898), Ap. J. 8, S. 218 (1898).

Umwandlung der Messungsergebnisse in Wellenlängen vermehrt, aber die Genauigkeit der Rechnung ganz wesentlich erhöht wurde. Die Formel von HARTMANN lautet

$$s - s_0 = \frac{c}{(\lambda - \lambda_0)^\alpha} \quad (2)$$

Sie stellt die spektrographischen Messungen über einen nicht allzu großen Messungsbereich nicht nur vollkommen dar, wie beispielsweise¹ folgende Tabelle zeigt, sondern sie erfaßt auch für große Messungsbereiche den funktionalen Zusammen-

s	λ ROWLAND	λ Formel	$\lambda_R - \lambda_s$
14 ^P ,8974	4673,347	4673,344	+ 0,003
17 ,2885	4654,743	4654,759	- 16
20 ,1446	4633,078	4633,075	+ 3
25 6502	4592,796	4592,789	+ 7
29 ,7600	4563,939	4563,954	- 15
31 ,1828	4554,211	4554,207	+ 4
38 ,1030	4508,455	4508,444	+ 11
40 ,2562	4494,738	4494,740	- 2
43 ,2288	4476,214	4476,219	- 5
47 ,9205	4447,892	4447,893	- 1
51 ,7405	4425,608	4425,614	- 6
54 ,8733	4407,851	4407,847	+ 4
60 ,6717	4376,107	4376,103	+ 4
63 ,7593	4359,784	4359,780	+ 4
67 ,4763	4340,634	4340,638	- 4
71 ,8454	4318,817	4318,825	- 8
79 ,4465	4282,565	4282,548	+ 17
81 ,0921	4274,958	4274,965	- 7
85 ,6317	4254,505	4254,502	+ 3
90 ,9952	4231,183	4231,183	0,000

hang zwischen s und λ so weitgehend, daß nur noch eine kleine, leicht und sicher auszuführende graphische Interpolation nötig ist, um die überhaupt erreichbare Genauigkeit zu sichern. Die praktische Erfahrung hat gezeigt, daß man eine solche zusätzliche Verbesserung (sie kann übrigens auch ohne Muhe rechnerisch erfolgen, da die Verbesserungen sich fast stets durch eine einfache Formel darstellen lassen) immer nötig hat, wenn man eine für eine bestimmte Platte gefundene Formel auch auf andere Platten anwenden will. Die Werte der vier Konstanten der Formel (2) hängen nämlich ziemlich stark von der Apparattemperatur ab, bei welcher die Aufnahmen gewonnen wurden, und können

sich von Platte zu Platte so merklich ändern, daß die für eine bestimmte Platte berechnete Formel nicht ohne weiteres für Platten anwendbar bleibt, die bei einer anderen Temperatur erhalten wurden. Durch die zusätzliche graphische oder rechnerische Verbesserung kann aber in diesem Fall ein vollständiger Anschluß erreicht werden, und man braucht dann nicht für jede einzelne Platte die etwas umständliche Berechnung von (2) vorzunehmen.

Es ist also eigentlich überhaupt gar nicht nötig, sich die Arbeit einer strengen Aufstellung der Gleichung (2) zu machen, es genügt vielmehr, Gleichung (2) so zu berechnen, daß die nachtraglich anzubringenden Korrekturen so klein bleiben, daß sie mit voller Sicherheit graphisch oder rechnerisch erlangt werden können. Das ist stets dann der Fall, wenn man ein Vergleichsspektrum mit vielen, günstig verteilten Linien (Fe, Ti usw.) hat, deren Wellenlängen mit genügender Genauigkeit bekannt sind. Ein solches Vergleichsspektrum steht heutzutage stets zur Verfügung.

43 Die Berechnung der Formel (1) nach CORNU Trotz dieser Erfahrung soll doch gezeigt werden, wie man die Konstanten der Gleichungen (1) und (2) streng berechnet. Man wird bei allen Anwendungen zunächst von der CORNUSchen Formel ausgehen und erst, wenn sich zeigt, daß diese nicht genügt, die mühsamer zu berechnende HARTMANNSche Formel heranziehen.

Für die Bestimmung der drei Konstanten s_0 , λ_0 , c der Gleichung (1) genügen drei Linien, die zweckmäßig so ausgesucht werden, daß die erste am

¹ A N 155, S 103 (1901). Die Formel selbst lautet $\lambda = 3280,596 + \left(\frac{[4,3568195]}{s + 280,5608} \right)^{1/4}$.

Beginn, die zweite in der Mitte und die dritte am Ende der Messungsreihe liegt. Es ist dann

$$\lambda_n - \lambda_0 = \frac{c}{s_n - s_0}, \quad n = 1, 2, 3$$

oder nach den Unbekannten aufgelöst

$$\left. \begin{aligned} s_0 &= \frac{s_1(\lambda_1 - \lambda_3)(s_3 - s_2) - s_3(\lambda_2 - \lambda_3)(s_2 - s_1)}{(\lambda_1 - \lambda_2)(s_3 - s_2) - (\lambda_2 - \lambda_3)(s_2 - s_1)}, & c &= \frac{(s_3 - s_0)(s_1 - s_0)(\lambda_1 - \lambda_3)}{s_3 - s_1}, \\ \lambda_0 &= \lambda_1 - \frac{c}{s_1 - s_0} = \lambda_2 - \frac{c}{s_2 - s_0} = \lambda_3 - \frac{c}{s_3 - s_0} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Die drei Werte von λ_0 müssen, falls die Rechnung richtig geführt wurde, übereinstimmen. Will man mehr als drei Linien zur Bestimmung der Konstanten von (1) verwenden (das ist immer von Vorteil, da zufällige Messungsfehler in den s_n unvermeidlich und Fehler in den Wellenlängen λ_n wohl häufig vorhanden sind), so benutzt man die aus (3) erhaltenen Werte von s_0 , λ_0 , c als erste Annäherung, die man unter Anwendung aller übrigen gemessenen Linien nach der Methode der kleinsten Quadrate verbessert. Es ist

$$\left. \begin{aligned} d\lambda_n &= d\lambda_0 + \frac{\lambda_n - \lambda_0}{s_n - s_0} ds_0 + \frac{\lambda_n - \lambda_0}{c} dc \\ d\lambda_n &= d\lambda_0 + \frac{c}{(s_n - s_0)^2} ds_0 + \frac{dc}{s_n - s_0} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Es hat sich nun aber gezeigt, daß bei der Berechnung einer der Gleichungen (4) mittels der Methode der kleinsten Quadrate fast immer die Korrekturen $d\lambda_0$, ds_0 , dc mit nur geringem Gewicht, also wenig sicher, gefunden werden. Setzt man aber $d\lambda_0 = 0$ und bestimmt nur die ds_0 und dc , so fällt dieser Mißstand fort, und man erhält die Konstanten der Gleichung (1) fast stets so, daß Gleichung (1) in dieser durch zahlreiche Linien bestimmten Gestalt die Beobachtungen wesentlich besser darstellt als bei einem Anschluß an nur drei Linien. Statt die Gleichungen (4) für jede einzelne Wellenlänge λ_n aufzustellen, kann man eine Anzahl Werte $d\lambda_n$ zu einem „Normalort“ zusammenfassen und für den Mittelwert der dazugehörigen λ_n das entsprechende s_n mittels der provisorischen Gleichung (1) berechnen. Auf diese Weise wird eine Arbeitsersparnis ohne Einbuße an Genauigkeit erzielt.

44 Die Berechnung der Formel (2) von HARTMANN. Da diese Formel sich nicht mehr direkt auflösen läßt, muß man die vier Konstanten derselben durch das Verfahren der sukzessiven Näherungen finden. HARTMANN schlägt dazu folgenden Weg ein¹. Er nimmt für λ_0 und α plausible Werte an und ändert diese so lange, bis fünf Messungen s_n möglichst gut dargestellt werden. Da große Änderungen von α nur kleine Änderungen in der Darstellung der Beobachtungen bewirken, wird man leicht ein passendes α finden (s. nächste Ziffer). Man wähle also aus der Messungsreihe fünf möglichst gut bestimmte und gleichmäßig verteilte Linien aus mit den Wellenlängen $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ ($\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 < \lambda_4 < \lambda_5$), die entsprechenden Schraubenablesungen seien s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 ($s_1 > s_2 > s_3 > s_4 > s_5$). Setzt man nun zur Abkürzung

$$\beta_n = \frac{1}{(\lambda_n - \lambda_0)^\alpha},$$

so wird die HARTMANNsche Formel

$$s_n - s_0 = c\beta_n \quad (n = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (5)$$

¹ Z f Instrk 37, S 166 (1917)

Markiert man dann die in der ersten Hypothesenrechnung vorkommenden λ_0 , s_0 , c durch einen Strich oben λ'_0 , s'_0 , c' , so erhält man aus den Messungen s_1 und s_5

$$c' = \frac{s_1 - s_5}{\beta_1 - \beta_5}$$

und damit

$$s'_{01} = s_1 - c'\beta_1, \quad s'_{05} = s_5 - c'\beta_5,$$

wenn man die aus der ersten und fünften Linie gefundenen provisorischen Werte von s'_0 mit den unteren Indizes 1 und 5 (s'_{01} , s'_{05}) versteht. Es ist nun

$$s'_{01} = s'_{05},$$

aber der aus der dritten Linie s_3 gefundene Wert von

$$s'_{03} = s_3 - c'\beta_3$$

wird meist von den s'_{01} und s'_{05} verschieden sein, etwa

$$s'_{03} - s'_{01} = \Delta'_3$$

Die erste Regel von HARTMANN besagt dann: Ist Δ'_3 negativ, dann ist der angenommene Wert von λ'_0 zu klein, ist Δ'_3 positiv, so ist λ'_0 zu groß genommen.

Aus dieser Regel ersieht man, in welchem Sinne man bei unverändertem α das λ'_0 zu einer zweiten Hypothesenrechnung (λ''_0) ändern muß. Diese wird dann auf gleiche Weise durchgeführt, und man erhält wiederum eine Differenz

$$\Delta''_3 = s''_{03} - s''_{01},$$

wo die Größen s''_{01} , s''_{03} , Δ''_3 als zur zweiten Hypothese gehörend durch zwei Striche oben gekennzeichnet sind.

Für die dritte Näherung wird man einen Wert

$$\lambda'''_0 = \lambda''_0 + \Delta''_3 \frac{\lambda''_0 - \lambda'_0}{\Delta'_1 - \Delta'_3}$$

wählen.

Diese Näherungen sind so lange durchzuführen, bis die Differenz Δ_3 genügend klein geworden ist, d. h. bis die drei Messungen nahe denselben Wert s_0 liefern, ein Anzeichen dafür, daß die Gleichungen (5) durch das betreffende System von Konstanten α , λ_0 , s_0 , c sehr nahe erfüllt sind. Nun hat man noch eine Verbesserung des ursprünglich angenommenen Wertes der Konstanten α vorzunehmen, und das geschieht auf folgende Weise. Man setzt die aus der letzten Hypothesenrechnung gefundenen λ_0 , s_0 , c auch in die zweite und vierte Gleichung (5), wodurch man Werte s_{02} und s_{04} erhält, die von den $s_{01} = s_{03} = s_{05}$ meist verschieden sein werden. Man hat also wieder Differenzen

$$\Delta_2 = s_{02} - s_{01} \quad \text{und} \quad \Delta_4 = s_{04} - s_{01}$$

Dann besagt die zweite Regel von HARTMANN: Der Anschluß der Dispersionsformel an die Beobachtungen kann so lange durch Annahme eines anderen Wertes von α verbessert werden, als die Differenzen Δ_2 und Δ_4 entgegengesetztes Vorzeichen haben, und zwar ist α zu verkleinern, wenn Δ_2 negativ, zu vergrößern, wenn Δ_2 positiv ist. Dagegen ist die Anschlußfähigkeit der Formel erschöpft, wenn die Darstellungsreste (Δ_2 und Δ_4) in der ersten und zweiten Hälfte der Messungsreihe gleiches Vorzeichen haben und nahe gleich groß sind.

Aus dieser Regel erkennt man den Sinn, in welchem der ursprünglich angenommene Wert von α zu ändern ist. Nach Annahme eines zweiten entsprechend der Regel geänderten Wertes von α muß dann wiederum eine Reihe von Hypothesen über λ_0 nach dem oben geschilderten Verfahren durchgerechnet werden,

bis der ersten, dritten und fünften Messung genügt ist. Dann ersieht man wieder aus den Differenzen Δ_2 und Δ_4 , ob der zweite für α angenommene Wert geeignet ist. Alle diese Näherungen sind erst dann beendet, wenn den fünf Gleichungen (5) möglichst gut genügt wird. Zum Schluß wird man die Messungen sämtlicher Linien mittels der zuletzt gewonnenen Formel berechnen und prüfen, wie sie durch die Formel dargestellt werden. Sind die Differenzen zwischen dem bekannten und dem berechneten Wert noch merklich, so wird man die HARTMANNSche Formel durch einen Anschluß an sämtliche Messungen mittels der Methode der kleinsten Quadrate weiter verbessern (Ziff 46).

45 Der numerische Wert der Konstanten α . Über die Größe des Exponenten α läßt sich a priori nichts sagen. In der folgenden Tabelle sind die Werte

Observatorium	Zahl der Prismen	α	Quelle
Allegheny	1	1	Publ Allegheny Obs 1, S 13 u 15
Cambridge (England)	1	0,8	M N 71, S 667
Detroit	1	1	Publ Astr Obs Univ Michigan 1, S 141
Ottawa	1	1	Report of the Chief Astronomer 1909, S 175
Potsdam Spektr D	1	1,0	—
Potsdam Spektr I	1	1,0	Potsdam Publ 12, Nr 42, S 23
Potsdam Spektr VI	1	0,9	—
Victoria B C	1	1	Publ Astrophys Obs Victoria 1, S 331
Wien	1	0,9—1,0	Wien, Ann 25, Nr 1, S 45
Cambridge (England)	2	0,6	M N 71, S 667
Bonn	3	0,5	A N 166, S 182
Emerson McMillin	3	0,6	Ap J 21, S 309
Potsdam Spektr III	3	0,6	A N 155, S 103
Potsdam Spektr IV	3	0,66—0,7	Potsdam Publ 18, Nr 54, S 58
Potsdam Spektr V	3	0,7	(Visueller Teil des Spektrums)
Pulkowa	3	0,6	Ap J 19, S 88
Victoria B C	3	1	Publ Astrophys Obs Victoria 1, S 331
Cambridge (England)	4	0,25	M N 71, S 667
Cape of Good Hope	4	1	Cape Annals 10, Pt 2, S 30B
Potsdam, Quarzspektrograph Q und UQ	1	4—5	Astr Mitt Göttingen Nr 16, S 15

von α für eine Anzahl Spektrographen zusammengestellt. Aus ihr folgt rein statistisch, daß α für Einprismenspektrographen in der Nähe von $\alpha = 1$, für Dreiprismenspektrographen in der Nähe von $\alpha = 0,6$ liegt, ferner daß α mit wachsender Zahl der Prismen abnimmt. Wenn man berücksichtigt, daß die Prismen der Spektrographen der verschiedenen Observatorien aus verschiedenen Glassorten bestehen, daß die Kollimator- und Kameraobjektive verschiedene Konstruktionen und Brennweiten besitzen (für Wien und Pulkowa gilt $\alpha = 0,6$ sowohl für ein kurz-, als auch für ein langbrennweitiges Kameraobjektiv), daß ferner die Spektrographen für verschiedene Wellenlangenbezirke gebraucht werden (Spektr V Potsdam z B für λ 4800 bis λ 6500), so scheint es, als ob der Wert von α im wesentlichen von der Zahl der Prismen abhängt. Das ist eine bemerkenswerte Tatsache, für die keine Erklärung bekannt ist. Gewiß haben manche Beobachter sich darauf beschränkt, zur Vereinfachung der Rechnung $\alpha = 1$ anzunehmen und die dann meist schon kleinen Differenzen zwischen den bekannten und den aus der Formel berechneten Wellenlangen nachtraglich auszugleichen, aber z B für die Spektrographen von Potsdam und Wien ist eine Reihe Werte von α durchgerechnet und der günstigste ausgenutzt worden, so daß es doch den Anschein hat, als ob sich eine Gesetzmäßigkeit in den Zahlenwerten von α der

obigen Tabelle aussprache Jedenfalls kann man aus ihr entnehmen, daß man bei Versuchen, die Konstante α für einen Glasprismenspektrographen genau zu finden, bei einem Prisma vom Werte $\alpha = 1$, bei drei Prismen vom Werte $\alpha = 0,6$ auszugehen hat Für Spektrographen mit Prismen aus anderem Material als Glas, z B aus Quarz, nimmt dagegen α ganz andere Werte an, wie die letzte Reihe der Tabelle zeigt

46 Anschluß der HARTMANNSchen Formel an zahlreiche Messungswerte
Zur Ableitung der HARTMANNSchen Formel sind nach seinen sehr zweckmäßigen Rechenvorschriften nur fünf Messungen verwendet worden Es ist Voraussetzung, daß sowohl die Wellenlängen dieser fünf Linien mit großer Genauigkeit bekannt sind, als auch insbesondere, daß die Messungen selbst möglichst fehlerfrei sind Beide Bedingungen werden meist nicht erfüllt sein, und man wird deshalb wünschen, die Formel durch Anschluß an zahlreiche Messungswerte so zu verbessern, daß sie alle möglichst gut darstellt

Aus den vorangehenden Rechnungen sind nun bereits gute Näherungswerte für die vier Konstanten α , c , λ_0 , s_0 vorhanden, die man als Ausgangswerte für eine Verbesserungsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate benutzen kann Die Differentiation der HARTMANNSchen Gleichung liefert die Differentialformeln

$$\Delta\lambda_n = \Delta\lambda_0 + \frac{1}{\alpha} \frac{\lambda_n - \lambda_0}{s_n - s_0} \Delta s_0 + \frac{1}{\alpha} \frac{\lambda_n - \lambda_0}{c} \Delta c,$$

$$\Delta s_n = \Delta s_0 + \alpha \frac{s_n - s_0}{\lambda_n - \lambda_0} \Delta\lambda_0 + \frac{s_n - s_0}{c} \Delta c$$

Die Konstante α ist in diesen Formeln als bekannt und nichtverbesserungsbedürftig angenommen worden Im allgemeinen bringen nur große Änderungen von α Verbesserungen in der Darstellung der Messungen durch die HARTMANNSche Gleichung Da man aber bei den vorangehenden Näherungsverfahren doch verschiedene Werte des Exponenten α durchzuprobieren und für einen jeden eine Formel zu rechnen hat, so hat man schon ein Urteil, welcher Wert α zu wählen sein wird Man berechnet nämlich mittels der aus fünf Messungen abgeleiteten Formeln die $\Delta\lambda_n$ bzw Δs_n für alle gemessenen Linien und bildet die Fehlerquadrate $(\Delta\lambda_n)^2$ bzw $(\Delta s_n)^2$ für jeden durchprobierten Wert α Man trägt dann die Summe der Fehlerquadrate als Ordinaten, die zugehörigen Exponenten α als Abszissen in Millimeterpapier ein und erhält so eine Kurve, aus der man denjenigen Wert von α als den besten entnimmt, für den die Summe der Fehlerquadrate am kleinsten ist

Hat man auf diese Weise α bestimmt, so löst man eine der obigen Gleichungen nach der Methode der kleinsten Quadrate auf Auch hier zeigt sich, daß die Korrekturen $\Delta\lambda_0$, Δs_0 , Δc nur unsicher gefunden werden, wenn man nicht $\Delta\lambda_0 = 0$ setzt Daß diese Vereinfachung erlaubt ist, haben verschiedene ausgeführte numerische Rechnungen erwiesen

Numerische Beispiele für die Berechnung der HARTMANNSchen Formel sind enthalten in Potsdam Publ 18, Nr 54 (1907) sowie in Ann Univ-Sternw Wien 25, Nr 1 (1913)

47. Darstellung der Messungen durch die HARTMANNSche Gleichung Es zeigte sich bei den zahlreichen Anwendungen der HARTMANNSchen Formel, auch wenn sie durch einen Anschluß mittels der Methode der kleinsten Quadrate an eine sehr große Zahl von Linien des Vergleichsspektrums gewonnen worden war, daß sie im allgemeinen nicht imstande ist, die Messungen in aller Strenge darzustellen, sobald der Wellenlangenbezirk groß ist, wie es bei den meisten modernen Spektrographen der Fall ist Bei großem Bereich werden stets Diffe-

renzen zwischen den bekannten Wellenlangen der Vergleichslinien und den nach der Formel berechneten vorhanden sein, und diese Differenzen besitzen keinen zufälligen, sondern einen systematischen Charakter. HARTMANN fand, daß diese systematischen Differenzen nicht allein durch Fehler im System der benutzten Wellenlangen oder durch Messungsfehler selbst verursacht werden, sondern daß seine Gleichung, die ja nur eine Interpolationsformel ist, zur Darstellung großer Wellenlangenbezüge eben nicht ausreicht. Dieser Tatsache sollte stets Rechnung getragen werden namentlich dann, wenn in einem weit ausgedehnten Spektrum aus wenigen bekannten Linien die Formel berechnet und dann zur Wellenlangenbestimmung anderer Linien benutzt wird, ein Fall, der z. B. bei der Auswertung eines mit dem Objektivprisma erhaltenen Flashspektrums eintritt.

Bei sorgfältiger Berechnung der Formel werden die verbleibenden Differenzen aber selbst in einem weiten Wellenlangenbezug so klein bleiben, daß sie durch eine graphische Verbesserung mit voller Sicherheit und restlos beseitigt werden können. Man trägt die Wellenlänge etwa in ganzen Ångströmeinheiten als Abszissen in Millimeterpapier ein, die zugehörigen Differenzen als Ordinaten, und legt durch die so erhaltenen Punkte eine glatte, sich möglichst eng anschließende Kurve. Aus dieser können dann die Korrekturen entnommen und an die aus der Formel berechneten Wellenlangenwerte angebracht werden (siehe Abb 20). Selbstverständlich kann an Stelle des graphischen Verfahrens auch ein rechnerisches treten.

Die Anwendung dieses einfachen Verfahrens kann übrigens weiter ausgedehnt werden. Auch bei Anschluß der HARTMANNschen Formel an nur fünf Linien wird man fast immer eine Formel erhalten, die schon so nahe richtig ist, daß die verbleibenden Differenzen zwischen den bekannten und den aus der Formel berechneten Wellenlangen so klein sind, daß sie auf die soeben beschriebene Art mit voller Sicherheit korrigiert werden können. Ja in vielen Fällen kann man auf die Bestimmung des Exponenten α überhaupt verzichten, $\alpha = 1$ setzen und aus den verbleibenden Abweichungen graphisch oder rechnerisch die nötigen Korrekturen bestimmen. Der Sinn der HARTMANNschen Formel ist eben der, die funktionelle Abhängigkeit zwischen den Messungen und den Wellenlangen nur in der Hauptsache und so weit zu erfassen, daß die weitere Verbesserung leicht und sicher graphisch ausgeführt werden kann. Sowohl CORNU als auch HARTMANN sind sich durchaus bewußt gewesen, daß ihre Formeln nicht physikalischer, sondern interpolatorischer Natur sind.

48 Auswahl der Linien zur Ableitung der Interpolationsformel Die Wahl der Linien, die zur Berechnung benutzt werden sollen, muß natürlich mit großer Sorgfalt vorgenommen werden. Linien, die unscharf, einseitig verwaschen sind, ebenso solche, die eng benachbarte Begleiter haben, können nicht gebraucht werden. Da die Linien des Vergleichsspektrums demselben Wellenlangensystem angehören müssen, in dem die Sternlinien bestimmt werden, entnahm man früher die Wellenlangen auch der Vergleichslinien der „Preliminary Table of Solar Spectrum Wave-Lengths“ von ROWLAND, die mehrere Jahrzehnte hindurch als Grundlage für alle astrophysikalischen Spektraluntersuchungen gedient hat. Im Sonnenspektrum gibt es aber verhältnismäßig nur sehr wenige wirklich einfache Linien. Es kommt hinzu, daß eng benachbarte Linien, die in den Aufnahmen mit sehr großer Dispersion noch getrennt sind, in den Aufnahmen mittels der Sternspektrographen nicht mehr getrennt werden können, sondern zusammenfließen. Dies erschwert natürlich in hohem Maße die Auswahl der Linien. Man hat sich allgemein damit beholfen, daß man bei Entnahme der Wellenlangen aus der Preliminary Table in solchen Fällen den

Wellenlangen als Gewicht die Intensitätsangaben ROWLANDS gab und für die mit dem Sternspektrographen erhaltenen Linien als Wellenlangen das Mittel der Wellenlangen unter Berücksichtigung dieser Gewichte nahm. Im allgemeinen hat man die Erfahrung gemacht, daß diese gewichteten Mittelwerte zuverlässige Wellenlangen geben wenigstens für die Sterne, die ein dem Sonnenspektrum gleiches oder ähnliches Spektrum besitzen.

Nachdem nun die „Revision of ROWLAND'S Preliminary Table of Solar Spectrum Wave-Lengths“¹ (R P T) erschienen ist, wird man in Zukunft diese Tafel zum Vergleich mit den Sternspektren benutzen. Das System der R P T ist, wie ADAMS² ausführt, ein einheitliches System, während die Wellenlangen der Laboratoriumsmessungen nicht notwendigerweise homogen sind. Bei Benutzung der R P T-Wellenlangen für die Sternlinien und der aus Laboratoriumsmessungen folgenden Wellenlangen für die Vergleichslinien, wird der Stern an die Sonne angeschlossen. Es ist in diesem Falle folgendes zu berücksichtigen: Zwischen den Sonnen- und Laboratoriumswellenlangen besteht eine kleine Verschiebung (etwa $+0,5$ km pro sek), die wahrscheinlich durch die Rotverschiebung der Relativitätstheorie verursacht ist und keine Geschwindigkeit bedeutet. Diese Verschiebung ist in der resultierenden Radialgeschwindigkeit des Sterns enthalten und muß, falls man die Radialgeschwindigkeit davon frei haben will, durch Anbringung einer Korrektur von etwa $0,5$ km mit richtigem Vorzeichen beseitigt werden. Benutzt man die Wellenlangen der R P T sowohl für die Sternlinien, als auch für die Vergleichslinien, so ist natürlich diese Korrektur nicht nötig. Die „Revision“ enthält außer den Wellenlangen der Linien und den Intensitäten der letzteren noch eine große Zahl höchst wertvoller spektroskopischer und astrophysikalischer Daten, so daß sie zweifellos das Standardwerk für die nächsten Jahrzehnte sein wird. Man verdankt dieses große Werk den langjährigen Arbeiten der Astrophysiker und Physiker des Mt Wilson-Observatoriums.

49 Abhängigkeit der Konstanten der Interpolationsformel von der Temperatur. Da die Dispersion der Prismen und die Fokaleinstellungen des Kollimators und der Kamera von der Temperatur abhängig sind, müssen auch die Konstanten der Interpolationsformel, insbesondere der Skalenwert c , Funktionen der Temperatur sein. Die Erfahrung hat gezeigt, daß der Exponent α unempfindlich in bezug auf die Temperatur ist und ein einmal berechneter Wert für alle Temperaturen beibehalten werden kann. Bei den anderen Konstanten ist die Temperaturabhängigkeit so ausgeprägt, daß man eine Formel, die für die Temperatur t gültig ist, kaum mehr zu Reduktionen von Platten brauchen kann, die bei Temperaturen erhalten wurden, die von t um $\pm 5^\circ$ abweichen. Nachstehende

$s_0 - s_1$	t	λ_0 Å	s_0	$\log c$
$67^R,508$	-15°	3277,6	$298^R,62$	4,3551637
$67,750$	-4	3278,7	$299,52$	4,3559912
$67,992$	$+7$	3279,8	$300,41$	4,3568142
$68,234$	$+18$	3280,9	$301,30$	4,3576286
$68,476$	$+29$	3282,0	$302,18$	4,3584374

Tabelle läßt diese Tatsache³ (Spektrograph III Potsdam) klar erkennen. Der einfachste Weg wäre, für jedes Sternspektrogramm eine eigene Formel zu rechnen oder wenigstens für eine größere Anzahl von Spektren, die bei verschiedenen

Temperaturen aufgenommen sind. Das wäre aber eine sehr zeitraubende Arbeit, ferner wurden die zufälligen Fehler der Messungen und auch der Wellenlangen zu stark die Rechnung beeinflussen und die Auffindung eines einfachen

¹ Carnegie Institution of Washington Publication Nr 396 Washington 1928

² Transactions I A U 4, S 185 (1933)

³ A N 155, S 107 (1901) Tabelle XIII

Zusammenhang zwischen den Konstanten der Formel einerseits und der Temperatur andererseits erschweren HARTMANN hat daher in seiner bereits öfter erwähnten Abhandlung (S 105) folgendes Verfahren angegeben, das von diesen Nachteilen frei ist und sich bei langjähriger Anwendung z B auf dem Potsdamer Observatorium auf das beste bewahrt hat

Zunächst benutzt HARTMANN als unabhängige Variable nicht die Temperatur, die das Thermometer des Spektrographen anzeigt, sondern die lineare Ausdehnung ($s_3 - s_1$) zwischen den zwei äußersten Linien λ_1 und λ_3 des Spektrums, die noch sicher zu messen sind Dies ist insofern vorteilhaft, als das Thermometer wohl nur ausnahmsweise, jedenfalls sehr selten, die momentane, während der Aufnahme wirklich vorhandene Temperatur der optischen Teile, besonders der Prismen, des Spektrographen angibt Das Verfahren von HARTMANN gestaltet sich demnach so Für die Bestimmung der drei Konstanten c , λ_0 , s_0 (α wird als unabhängig von der Temperatur und als unveränderlich angenommen) sind drei Messungen s_1 , s_2 , s_3 von drei Linien λ_1 , λ_2 , λ_3 nötig Diese drei Linien mißt man in einer Reihe von Spektren, die bei möglichst verschiedenen Temperaturen erhalten worden sind Die drei Linien seien möglichst gleichmäßig über das Spektrum verteilt, d h es mögen λ_1 etwa am Anfang, λ_2 in der Mitte, λ_3 am Ende des meßbaren Bereiches liegen Den Zahlenwert s_2 für die mittlere Linie λ_2 kann man willkürlich festsetzen es soll s_2 denselben Wert bei allen Temperaturen besitzen Das heißt weiter nichts, als daß die zu messende Platte so in den Meßapparat eingelegt wird, daß die mittlere Linie λ_2 stets dieselbe Schraubenablesung ergibt Diese Festsetzung stellt also keine Beschränkung dar Die einzelnen Messungen werden aber nun nicht direkt zur Bestimmung von λ_0 , s_0 , c benutzt, sondern erst einer Ausgleichung unterzogen, durch welche die zufälligen Fehler der Messungen möglichst unschädlich gemacht werden Man konnte etwa ansetzen

$$\frac{s_2 - s_1}{s_3 - s_1} = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 +$$

Besser ist es aber, wenn man als unabhängige Variable nicht t , sondern, wie bereits oben erwähnt, $s_3 - s_1$ wählt

$$\frac{s_2 - s_1}{s_3 - s_1} = b_1 + b_2 (s_3 - s_1) + b_3 (s_3 - s_1)^2 +$$

oder man stellt $\log \frac{s_2 - s_1}{s_3 - s_1}$ als Potenzreihe von $s_3 - s_1$ dar, was in manchen Fällen etwas bequemer ist Dieses Gleichungssystem, das so viele Gleichungen enthält, als man Spektralaufnahmen bei verschiedenen Temperaturen hat, wird nach der Methode der kleinsten Quadrate aufgelöst In den meisten Fällen können das quadratische und die höheren Glieder vernachlässigt werden Das lineare Glied ist aber, wie man sofort sieht, immer mitzunehmen, da $\frac{s_2 - s_1}{s_3 - s_1}$ nicht konstant ist, d h man kann nicht von einem Spektrum zum anderen durch alleinige Änderung der Konstante c übergehen Als Beispiel sei die für den Potsdamer Spektrographen IV erhaltene Formel angeführt

$$\frac{s_2 - s_1}{s_3 - s_1} = 0,35489 - 0,001236 (s_3 - s_1)$$

oder

$$\log \frac{s_2 - s_1}{s_3 - s_1} = [9,54915] - 0,00159 (s_3 - s_1)$$

Mittels dieser Formel und dem einmal festgesetzten Wert von s_2 berechnet man nun eine Anzahl aquidistanter Werte von $s_3 - s_1$, daraus die s_1 und s_3

und mit diesen dann die drei Konstanten s_0 , λ_0 , c Für den Potsdamer Spektrographen IV ergaben sich beispielsweise folgende Zahlen

t	$s_3 - s_1$	s_1	s_2	s_3	λ_0 Å	v_0	$\log c$
+25°	36 ¹ ,313	18 ^R ,742	30 ^R ,000	55 ^T ,055	3126,0	-179 ¹ ,933	4,472934
+20	36 ,267	18 ,754	30 ,000	55 ,021	3124,0	-180 ,055	4,473700
+15	36 ,221	18 ,766	30 ,000	54 ,987	3122,5	-180 ,070	4,474116
+10	36 ,174	18 ,779	30 ,000	54 ,953	3121,3	-180 ,029	4,474339
+5	36 ,128	18 ,791	30 ,000	54 ,919	3120,0	-180 ,012	4,474635
0	36 ,082	18 ,804	30 ,000	54 ,886	3119,0	-179 ,936	4,474735
-5	36 ,036	18 ,816	30 ,000	54 ,852	3118,0	-179 ,858	4,474828
-10	35 ,990	18 ,829	30 ,000	54 ,819	3116,8	-179 ,815	4,475047

Die in der ersten Kolumne enthaltenen t entsprechen angenähert den in der folgenden Kolumne stehenden $s_3 - s_1$

50 Berechnung von Reduktionstafeln mittels der HARTMANNschen Formel¹.

Handelt es sich nicht um die Auswertung einiger einzelnen Spektren, sondern um die einer großen Zahl, so ist es zweckmäßig, mit Hilfe der für verschiedene Temperaturen gewonnenen Formeln Tafeln zu rechnen, aus denen sich durch einfache Interpolation die gewünschten Werte finden lassen. Je nach der Reduktionsmethode wird man entweder Tafeln mit dem Argument s_n (Schraubenablesung) rechnen, aus denen man dann die λ_n interpoliert, oder aber Tafeln mit dem Argument λ_n , aus denen man die zugehörigen s_n entnimmt. Tabelle 1

Tabelle 1

t	-10°	-5°	0°	+5°	+10°	+15°	+20°
$s_3 - s_1$	35 ^R ,990	36 ^R ,036	36 ^R ,082	36 ^R ,128	36 ^R ,171	36 ^R ,221	36 ^R ,267
s_n	λ_n (Å)	λ_n (Å)	λ_n (Å)	λ_n (Å)	λ_n (Å)	λ_n (Å)	λ_n (Å)
18 ^R ,0	4524,85	4524,72	4524,59	4524,45	4524,33	4524,19	4521,07
,1	23,77	23,64	23,51	23,37	23,26	23,12	23,00
,2	22,70	22,57	22,44	22,30	22,19	22,05	21,93
,3	21,62	21,50	21,37	21,23	21,12	20,99	20,86
,4	20,55	20,42	20,30	20,16	20,05	19,92	19,79
,5	19,48	19,35	19,23	19,09	18,98	18,85	18,73
,6	18,41	18,28	18,16	18,03	17,91	17,79	17,67
,7	17,34	17,21	17,10	16,97	16,84	16,73	16,61
,8	16,27	16,15	16,03	15,90	15,78	15,67	15,55
,9	15,21	15,08	14,97	14,84	14,72	14,61	14,49
19,0	4514,14	4514,02	4513,90	4513,78	4513,66	4513,55	4513,43
40,0	4317,65	4317,74	4317,84	4317,92	4318,02	4318,11	4318,20
,1	16,82	16,92	17,02	17,10	17,20	17,29	17,39
,2	16,00	16,10	16,20	16,28	16,38	16,47	16,57
,3	15,18	15,28	15,38	15,47	15,56	15,66	15,75
,4	14,36	14,46	14,56	14,65	14,74	14,85	14,94
,5	13,55	13,64	13,75	13,84	13,93	14,03	14,13
,6	12,73	12,82	12,94	13,02	13,12	13,22	13,31
,7	11,92	12,01	12,12	12,21	12,31	12,41	12,50
,8	11,10	11,19	11,31	11,40	11,50	11,60	11,69
,9	10,29	10,38	10,50	10,59	10,69	10,79	10,88
41,0	4309,47	4309,56	4309,68	4309,78	4309,88	4309,98	4310,07

gibt ein Beispiel für die erste Art von Tafeln (Potsdamer Spektrograph IV), die folgende Tabelle 2 ein solches für die zweite Art (Potsdamer Spektrograph IV)

¹ A N 155, S 108 (1901), 182, S 361 (1909)

Tabelle 2

λ	-10°	-5°	0°	$+5^\circ$	$+10^\circ$	$+15^\circ$	$+20^\circ$
4531,33	17 ^h ,402	17 ^h ,388	17 ^h ,375	17 ^h ,362	17 ^h ,350	17 ^h ,337	17 ^h ,325
28,80	17 ,635	17 ,622	17 ,609	17 ,596	17 ,584	17 ,572	17 ,559
25,31	17 ,957	17 ,945	17 ,932	17 ,920	17 ,908	17 ,896	17 ,884
4494,75	20 ,845	20 ,835	20 ,825	20 ,815	20 ,807	20 ,798	20 ,788
89,93	21 ,310	21 ,301	21 ,292	21 ,282	21 ,274	21 ,265	21 ,256
84,42	21 ,846	21 ,836	21 ,828	21 ,819	21 ,812	21 ,803	21 ,795
76,21	22 ,650	22 ,642	22 ,634	22 ,626	22 ,620	22 ,612	22 ,604
69,57	23 ,307	23 ,299	23 ,293	23 ,285	23 ,279	23 ,272	23 ,265
66,74	23 ,589	23 ,581	23 ,575	23 ,568	23 ,562	23 ,555	23 ,548
61,84	24 ,078	24 ,071	24 ,066	24 ,059	24 ,053	24 ,047	24 ,041
54,57	24 ,811	24 ,805	24 ,800	24 ,794	24 ,789	24 ,784	24 ,778
47,91	25 ,488	25 ,483	25 ,478	25 ,473	25 ,469	25 ,464	25 ,459
42,52	26 ,040	26 ,036	26 ,031	26 ,027	26 ,023	26 ,019	26 ,014
30,80	27 ,255	27 ,251	27 ,248	27 ,245	27 ,242	27 ,240	27 ,236
27,49	27 ,600	27 ,597	27 ,595	27 ,592	27 ,590	27 ,587	27 ,584

Für die Linien des Vergleichsspektrums (Fe), deren λ_n bekannt sind, werden mit Hilfe der HARMANNschen Formel ein für allemal die Schraubenablesungen für die verschiedenen $s_3 - s_1$ berechnet. Die folgende Tabelle 3 gibt eine Probe einer derartigen Tafel, und zwar für den Spektrographen III.

Tabelle 3

Linie N_1	λ_n	$s_1 - s_2$ 67 ^h ,860	$s_1 - s_1$ 67 ^h ,948	$s_2 - s_1$ 68 ^h ,036	$s_1 - s_1$ 68 ^h ,124
1	4572,16	8 ^h ,697	8 ^h ,640	8 ^h ,584	8 ^h ,526
2	4554,21	11 ,296	11 ,242	11 ,190	11 ,136
3	4549,77	11 ,949	11 ,895	11 ,843	11 ,790
4	4534,17	14 ,268	14 ,218	14 ,169	14 ,119
5	4522,87	15 ,978	15 ,930	15 ,883	15 ,836

51 Verwandlung von Wellenlängendifferenzen oder Schraubenablesungsdifferenzen in Kilometer Die Radialgeschwindigkeit V eines Sterns in der Gesichtslinie ist nach dem DOPPLERSchen Prinzip

$$V = \frac{L}{\lambda} d\lambda,$$

wo L die Lichtgeschwindigkeit (299860 km) ist. In nachstehender Tabelle 4 sind die Umwandlungsfaktoren L/λ für den Bereich von 4000 bis 4600 Å gegeben. Die Zahl V stellt die Bewegung in Kilometern pro Sekunde dar, welche einer Verschiebung um ein Å entspricht. Hat man Schraubenablesungsdifferenzen statt Wellenlängendifferenzen in Kilometer zu verwandeln, so hat man $d\lambda$ in

$$V = \frac{L}{\lambda} d\lambda$$

durch ds zu ersetzen

$$d\lambda = -\frac{(\lambda - \lambda_0)^{\alpha+1}}{\alpha c} ds$$

Da die Konstanten λ_0 und c temperaturabhängig sind, wie in Ziff 49 dargelegt ist, so müssen sie der Temperatur entsprechend genommen werden. Zweckmäßigerweise wird man aber den Koeffizienten für die verschiedenen vorkommen-

den Temperaturen tabulieren Tabelle 5 gibt ein Beispiel hierfür (Potsdamer Spektrograph III) Sie enthält die Anzahl Kilometer, die einer Schrauben-

Tabelle 4

λ (Å)	V (km)	$\log V$	λ (Å)	V (km)	$\log V$
4000	74,965 187	1,87 486	4300	69,735 162	1,84 345
10	,778 186	1,87 377	10	,573 161	1,84 244
20	,592 185	1,87 269	20	,412 160	1,84 143
30	,407 184	1,87 161	30	,252 160	1,84 043
40	,223 184	1,87 054	40	69,092 159	1,83 943
50	74,039 184	1,86 946	50	68,933 158	1,83 843
60	73,857 182	1,86 839	60	,775 157	1,83 743
70	,676 181	1,86 732	70	,618 157	1,83 644
80	,495 181	1,86 626	80	,461 157	1,83 544
90	,315 180	1,86 519	90	,305 156	1,83 445
4100	73,136 179	1,86 413	4400	68,150 155	1,83 347
10	72,959 177	1,86 308	10	67,996 154	1,83 248
20	,782 177	1,86 202	20	,842 154	1,83 150
30	,605 177	1,86 097	30	,689 153	1,83 051
40	,430 175	1,85 992	40	,536 153	1,82 954
50	,255 175	1,85 887	50	,384 152	1,82 856
60	72,082 173	1,85 783	60	,233 151	1,82 758
70	71,909 173	1,85 678	70	67,083 150	1,82 661
80	,737 172	1,85 574	80	66,933 150	1,82 564
90	,566 171	1,85 470	90	,784 149	1,82 467
4200	,395 171	1,85 367	4500	,636 148	1,823 371
10	,226 170	1,85 264	10	,488 148	1,822 741
20	71,057 169	1,85 161	20	,341 147	1,821 780
30	70,889 168	1,85 058	30	,194 147	1,820 820
40	,722 167	1,84 955	40	66,048 146	1,819 862
50	,555 167	1,84 853	50	65,903 145	1,818 908
60	,390 165	1,84 751	60	,759 144	1,817 954
70	,225 165	1,84 649	70	,615 144	1,817 003
80	70,061 164	1,84 547	80	,472 143	1,816 054
90	69,898 163	1,84 446	90	,329 143	1,815 106
4300	69,735 163	1,84 345	4600	65,187 142	1,814 161

revolution entsprechen bei den links stehenden Wellenlängen, und zwar für die verschiedenen Temperaturen, die durch die $s_3 - s_1 = 67^R,860$ usw bestimmt sind

Tabelle 5

λ	$s_3 - s_1$			
	67 ^R ,860	67 ^R ,948	68 ^R ,036	68 ^R ,124
4572,16	458,0 km	457,4 km	456,8 km	456,2 km
4554,21	449,7	449,1	448,5	447,9
4549,77	447,6	447,0	446,5	445,9
4534,17	440,3	439,7	439,2	438,6
4522,87	435,1	434,5	434,0	433,4

52 Bestimmung der Wellenlänge mit Hilfe der Interpolationsformeln. In den vorstehenden Ziffern ist bereits mehrfach von der Bestimmung der Wellenlänge mittels der Formeln gesprochen worden. Es soll hier nun nochmals der Gang der Berechnung dargestellt und durch ein Beispiel erläutert werden. Es sei vorausgesetzt, daß neben dem Spektrum, dessen Linien unbekannte, zu bestimmende Wellenlängen haben, sich ein Vergleichsspektrum mit möglichst vielen und gleichmäßig verteilten Linien befindet, deren Wellen-

langen genau bekannt sind. Diese Voraussetzung ist heute bei den Sternspektren stets erfüllt, da man immer ein Vergleichsspektrum aufkopiert.

Die Interpolationsformel gibt, wie bereits erwähnt, in größeren Bereichen, wie sie meist oder wenigstens vielfach bei den Sternspektren in Frage kommen, keine strenge, sondern nur eine mehr oder minder angenäherte Beziehung zwischen den gemessenen Größen (z. B. den Schraubenablesungen) und den entsprechenden Wellenlängen, und zwar selbst dann, wenn die vier Konstanten der HARTMANNschen Formel aus sämtlichen Vergleichslinien unter Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate gefunden wurden. Die Differenzen zwischen den aus der Formel berechneten Wellenlängen und den strengen Werten derselben sind aber sehr klein. Unter diesen Umständen kann man nun weitergehen und die Interpolationsformel schon dann als genügend genau ansehen, wenn jene Differenzen so klein bleiben, daß eine nachträgliche Korrektur mit Sicherheit und mit einer den Messungen entsprechenden Genauigkeit abgeleitet werden kann. Es kann somit gleich von vornherein auf eine möglichst strenge Ableitung der Formel verzichtet werden, und weitgehende praktische Erfahrung hat gezeigt, daß dies durchweg erlaubt ist. Zunächst kann man für einen Spektrographen mit einem Prisma die Konstante $\alpha = 1$, für einen solchen mit drei Prismen $\alpha = 0,6$ setzen. Weiterhin können die drei anderen Konstanten (λ_0 , s_0 , c) der Formel aus Messungen von nur drei Linien berechnet werden, von denen die erste nahe am Anfang, die zweite nahe der Mitte und die dritte nahe am Ende des Spektrogrammes liegt. Die Berechnung der Interpolationsformel ist auf diese Weise sehr stark vereinfacht.

Mittels der so gewonnenen Formel berechnet man die Wellenlängen (λ_0) der übrigen Vergleichsspektrumlinien und vergleicht die so erhaltenen Werte mit den bekannten strengen λ . Die Differenzen $\lambda - \lambda_0$ werden zur Gewinnung der Korrekturen benutzt. Am zweckmäßigsten ist es, diese Korrekturen auf graphischem Wege abzuleiten. Man trägt die Schraubenablesungen der Vergleichslinien als Abszissen, die entsprechenden $\lambda - \lambda_0$ als Ordinaten in Millimeterpapier ein und legt durch die so erhaltenen Punkte eine glatte, sich möglichst gut anschließende Kurve. Aus dieser lassen sich die Korrekturen unmittelbar ablesen, die an die aus der Formel berechneten Wellenlängen λ_0 der Sternlinien anzubringen sind, um richtige Werte für die Wellenlängen zu erhalten. Selbstverständlich kann statt des graphischen Prozesses auch ein rechnerischer verwendet werden, er ist aber im allgemeinen umständlicher und mit größerer Arbeit verbunden als ersterer.

Durch ein Beispiel wird das ganze Verfahren am besten klar werden. Ein mit dem Potsdamer Spektrographen IV erhaltenes Eisenspektrum wurde ausgemessen (Kolumne 2 der obenstehenden Tabelle) und unter Annahme von $\alpha = 0,8$ ($\alpha = 0,6$ bis $0,7$ wäre besser gewesen, aber es ist absichtlich ein

Nr.	M	λ	$\lambda - \lambda_0$	$\lambda - \lambda_0$
1	6 ^h ,366	4528,798	$\pm 0,000$	$-0,006$
2	9 ,593	4494,738	+ 9	+ 5
3	11 ,406	4476,185	- 14	- 17
4	14 ,263	4447,892	- 24	+ 23
5	16 ,388	4427,482	+ 39	+ 38
6	17 ,680	4415,293	+ 11	+ 11
7	18 ,803	4404,927	+ 55	+ 55
8	21 ,136	4383,720	+ 22	+ 22
9	24 ,653	4352,908	+ 21	+ 9
10	26 ,500	4337,216	0	+ 3
11	29 ,160	4315,262	+ 22	+ 24
12	30 ,046	4308,081	+ 16	+ 18
13	31 ,772	4294,301	- 4	0
14	33 ,270	4282,565	- 20	- 16
15	36 ,140	4260,640	- 32	- 27
16	37 ,437	4250,945	- 49	- 45
17	37 ,528	4250,287	- 35	- 30
18	40 ,645	4227,606	- 53	- 51
19	44 ,275	4202,198	- 25	- 18
20	46 ,800	4185,058	- 55	- 49
21	51 ,102	4156,970	- 17	- 11
22	52 ,544	4147,836	- 10	- 2
23	55 ,056	4132,235	+ 3	+ 10
24	57 ,286	4118,708	0,000	+ 6

ungünstiger Wert gewählt worden) aus den Linien Nr 1, 13, 24 folgende Formel gerechnet

$$\lambda_c = 3054,50 + \left(\frac{[4,7676638]}{s + 164,555} \right)^{\frac{1}{0,8}}$$

Mittels dieser Formel sind die λ_c der übrigen Linien berechnet und die Differenzen $\lambda - \lambda_c$ gebildet worden (Kolumne 4) Diese Differenzen sind klein, haben

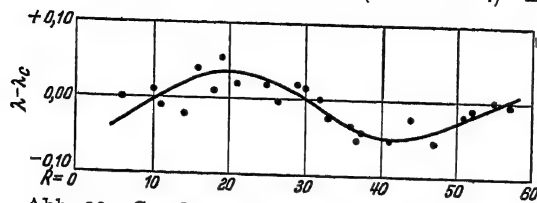


Abb 20 Graphische Ausgleichung der $\lambda - \lambda_c$

aber einen systematischen Verlauf, d. h. die Formel allein genügt nicht für eine Wellenlangenbestimmung. In Abb 20 sind deshalb die Schraubenablesungen R als Abszissen, die Differenzen als Ordinaten eingetragen, und eine Kurve ist gezeichnet worden, welche die Korrek-

tionen zu entnehmen gestattet. Waren nun Linien unbekannter Wellenlänge mitgemessen worden, so hatte man für sie mit der Formel zunächst die genäherten Wellenlangen zu berechnen und an diese die Korrekturen anzubringen, die ihrer Lage entsprechend aus der Kurve folgen, wodurch schließlich die strengen Werte der Wellenlangen erhalten werden.

Wenn man berücksichtigt, daß sich die Messungen von 410 Å nur über eine Strecke von 25 mm auf den Spektrogrammen verteilen, so erkennt man, daß durch die angenäherte Formel, in Verbindung mit der graphischen Korrektur, eine Genauigkeit erzielt ist, die nichts zu wünschen übrigläßt. Eine strenge Ausgleichung unter Anwendung sämtlicher Eisenlinien wurde folgende Formel ergeben

$$\lambda'_c = 3054,50 + \left(\frac{[4,7676484]}{s + 164,5485} \right)^{\frac{1}{0,8}},$$

und die letzte Kolumne der Tabelle zeigt, daß die Darstellung der Messungen durch sie ebensowenig befriedigend ist wie die durch die angenäherte Formel, man mußte somit auch die aus der obigen Formel gerechneten λ'_c durch zusätzliche Korrekturen verbessern.

53 Bestimmung von Wellenlangen aus Konkavgitteraufnahmen Es mag hier nebenbei erwähnt werden, daß auch die Bestimmung von Wellenlangen aus Gitteraufnahmen auf die gleiche Weise erfolgt, nur fällt die Berechnung der Interpolationsformel weg. Man mißt also zwei möglichst weit voneinander entfernte Linien λ_1 und λ_2 des Vergleichsspektrums, dann ist der Quotient $\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{s_2 - s_1}$ nahe konstant für den ganzen Spektralbereich auf der Platte, vorausgesetzt, daß man ihn nicht zu groß gewählt hat. Mit Hilfe dieses Quotienten berechnet man für die anderen Vergleichslinien die angenäherten Wellenlangen λ_c , bildet wiederum die Differenzen $\lambda - \lambda_c$ für alle Linien und erhält durch eine rechnerische oder, wie oben gezeigt, graphische Ausgleichung die Korrekturen, die an die λ_c der Linien anzubringen sind, deren genaue Wellenlangen gefunden werden sollen.

k Die Bestimmung der Radialgeschwindigkeit eines Sternes mit Hilfe der Formeln von CORNU und HARTMANN.

54 Einleitung Die Reduktion der Messungen eines Sternspektrums kann auf zweierlei Weise erfolgen: entweder geht man gleich von Anfang an von den Schraubenablesungen auf die Wellenlangen über (Verfahren LUDENDORFF-

EBERHARD¹⁾ oder man behält erstere bis zum Schluß bei (Verfahren CAMPBELL, HARTMANN usw.²⁾ Es ist schwer abzuschätzen, welches der beiden Verfahren den Vorzug verdient. Die zu leistende Arbeit ist nahezu die gleiche, es hängt daher in der Hauptsache die Wahl des Verfahrens von dem persönlichen Geschmack und der Gewohnheit des Beobachters ab. Beide Verfahren werden wesentlich erleichtert und abgekürzt, wenn man nicht für jedes einzelne Sternspektrum die Interpolationsformel, und sei es auch nur die einfache von CORNU, abzuleiten hat, sondern ein für allemal berechnete Tafeln benutzen kann. Da wohl ein jedes Observatorium, das die Bestimmung von Radialgeschwindigkeiten als Programm hat, solche Tafeln besitzen oder anlegen wird, soll für das Folgende das Vorhandensein solcher Tafeln vorausgesetzt werden. Ubrigens gestaltet sich im Prinzip der Arbeitsgang nicht wesentlich anders, wenn diese Voraussetzung nicht erfüllt ist.

55 Erstes Verfahren¹ Nachdem das Sternspektrogramm ausgemessen ist, wird die Differenz der Schraubenablesungen der beiden äußersten noch zur Verwendung geeigneten Linien des Vergleichsspektrums gebildet, dann diejenige der Tafeln (Ziff 49) ausgesucht, welche möglichst nahe dieselbe Differenz für die beiden benutzten Vergleichslinien gibt. In dem nun folgenden Beispiel, welches am besten den weiteren Gang der Reduktion zeigt, wurde dies die Tafel für $+10^{\circ}\text{C}$ sein. Die folgende Tabelle enthält ein Stück der Ausmessung und

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fe 20 ^h ,812	20 ^h ,807	-5	-5		A	A	A	km	km		
22 ,092			-4	22 ^h ,088	4481,59	4481,40	+0,19	66,9	+12,7	Mg	
Fe 22 ,623	22 ,620	-3	-4								
23 ,344			-3	23 ,341	4468,94	4468,66	+0,28	67,1	+18,8	Ti	
Fe 23 ,565	23 ,562	-3	-3								
Fe 24 ,057	24 ,053	-4	-3								
25 ,852			-2	25 ,850	4444,20	4443,98	+0,22	67,5	+14,8	Ti	
Fe 27 ,591	27 ,590	-1	-2								
28 ,870			-1	28 ,869	4415,43	4415,29	+0,14	67,9	+ 9,5	Fe	
Fe 28 ,885	28 ,882	-3	-1								
Fe 30 ,000	30 ,000	0	0								
32 ,312			+1	32 ,313	4383,89	4383,72	+0,17	68,4	+11,6	Fe	
Fe 32 ,331	32 ,332	+1	+1								
Fe 33 ,184	33 ,186	+2	+1								

Reduktion des Spektrums von γ Geminorum, das am 5 April 1909 mit dem Potsdamer Spektrographen IV aufgenommen worden war. Kol 1 enthält die Schraubenablesungen der Linien des Stern- und des Eisenspektrums, Kol 2 die Schraubenablesungen für die Eisenlinien nach den Werten der Tabelle 2, Ziff 49 (Referenzspektrum). Die Differenzen Kol 2 — Kol 1 in der Kol 3 werden nun graphisch ausgeglichen (Kol 4), und die ausgeglichenen Differenzen (Kol 4) werden an die den Linien des Sternspektrums entsprechenden Schraubenablesungen von Kol 1 angebracht, so daß Kol 5 die auf das Referenzspektrum reduzierten Messungen der Sternlinien darstellt. Nunmehr wird auf Wellenlängen übergegangen dadurch, daß man aus den Tafeln (Tab 1, Ziff 49) die Wellenlängen entnimmt, welche den Schraubenablesungen der Kol 5 entsprechen. Auf diese Weise wird Kol 6 erhalten. In Kol 7 sind die Wellenlängen der Linien enthalten, mit denen die Linien des Sternspektrums identifiziert wurden. Die Differenz Kol 6 — Kol 7 ist in Kol 8 aufgeschrieben, sie stellt die Verschiebung der Sternlinien infolge von Radialbewegung dar, und man hat diese Zahlen nun noch mit einem Faktor (Kol 9) zu multiplizieren, um die ursprünglich in Ängströmeinheiten aus-

¹ A N 182, S 361 (1909)² A N 155, S 81ff (1901), Ap J 8, S 142 (1898)

gedruckten Verschiebungen in Kilometern zu erhalten (Kol 10) Die Umwandlungsfaktoren werden einer Tafel mit dem Argument Wellenlänge entnommen (Ziff 50, Tab 4), sie sind, im Gegensatz zu den bei dem zweiten Verfahren zu verwendenden Faktoren von der Temperatur unabhängig Kol 10 enthält somit die gesuchte Radialgeschwindigkeit für die Linien des Sternspektrums, die den chemischen Elementen der Kol 11 zugehören

Bei diesem ersten Verfahren hat man also für jede Platte die Wellenlängen der Sternlinien aus den Tafeln zu interpolieren, was aber bei richtiger Anlage der Tafeln eine leichte und kleine Muhe ist

56 Zweites Verfahren. Hat man eine große Anzahl Spektrogramme ein und desselben Sternes zu bearbeiten, so ist das zweite Verfahren vielleicht etwas vorteilhafter als das erste, namentlich wenn man auch hier Tafeln benutzen kann Der Arbeitsgang soll für das zweite Verfahren gleichfalls wieder an einem Beispiel erläutert werden Es werde das Spektrum von α Ursae minoris reduziert, welches am 15 April 1900 mit dem Potsdamer Spektrographen III aufgenommen worden ist¹ Die folgende Tabelle enthält die gesamte Rechnung, und zwar bedeuten die Zahlen der Kol 1 die Messungsergebnisse (Schraubenablesungen)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fe 4 ^R ,581	4 ^R ,588	+7						
Fe 7 ,486	7 ,489	+3					km	km
11 ,234			+6	11 ^R ,240	11 ^R ,242	+ 2	449	+0,9
11 ,878			+6	11 ,884	11 ,895	+11	447	+4,9
Fe 12 ,430	12 ,433	+3						
14 ,200			+6	14 ,206	14 ,218	+12	440	+ 5,3
Fe 15 ,024	15 ,028	+4						
Fe 15 ,335	15 ,358	+3						
16 ,300			+6	16 ,306	16 ,307	+ 1	433	+0,4
17 ,046			+6	17 ,052	17 ,059	+ 7	431	+3,0
18 ,139			+6	18 ,145	18 ,149	+ 4	428	+1,7
19 ,237			+7	19 ,244	19 ,243	- 1	424	-0,4
Fe 19 ,936	19 ,940	+4						
19 ,916			+7	19 ,923	19 ,937	+14	423	+ 5,9
Fe 20 ,296	20 ,301	+5						
Fe 22 ,268	22 ,273	+5						
23 ,256			+7	23 ,263	23 ,269	+ 6	413	+ 2,5
Fe 23 ,268	23 ,274	+6						
24 ,488			+7	24 ,495	24 ,500	+ 5	410	+ 2,0
Fe 24 ,814	24 ,817	+3						
25 ,135			+7	25 ,142	25 ,140	- 2	408	- 0,8
Fe 25 ,622	25 ,627	+5						
26 ,028			+7	26 ,035	26 ,051	+16	405	+ 6,5
31 ,436			+6	31 ,442	31 ,451	+ 9	391	+ 3,5
Fe 31 ,437	31 ,440	+3						
33 ,270			+5	33 ,275	33 ,275	0	386	0,0
Fe 33 ,565	33 ,573	+8						
35 ,407			+4	35 ,411	35 ,413	+ 2	380	+0,8
37 ,154			+4	37 ,158	37 ,166	+ 8	376	+ 3,0
Fe 39 ,009	39 ,005	-4						
Fe 40 ,678	40 ,679	+1						

für das Vergleichsspektrum (Fe) wie für das Sternspektrum Man bildet wiederum die Differenz der Ablesungen der beiden äußersten Vergleichslinien und sucht aus den Tafeln für das Referenzspektrum (Tab 3, Ziff 49) diejenige aus, welche für diese zwei Linien nahe die gleiche Differenz besitzt Aus dieser Tafel entnimmt man dann die Zahlen der Kol 2 und mittels der Differenz

¹ A N 155, S 87 (1901), Ap J 8, S 142 (1898)

Kol 2 — Kol 1 = Kol 3 kann man das gemessene Spektrum auf das der Tafel (Referenzspektrum) reduzieren. Natürlich werden die Differenzen Kol 3 vorher wieder irgendwie ausgeglichen (Kol 4), und mittels dieser ausgeglichenen Werte werden dann auch die Linien des Sternes auf das System der Tafel (Referenzspektrum) gebracht (Kol 5). Jetzt sind die Sternlinien wieder zu identifizieren, etwa durch Vergleich mit dem Sonnenspektrum, und danach entnimmt man für diese so gefundenen Wellenlängen Tafeln, welche der Tabelle 2, Ziff 49, entsprechen wurden, die zu diesen Wellenlängen gehörenden Schraubenablesungen (Kol 6). Die Differenz Kol 6 — Kol 5 = Kol 7 stellt dann die Verschiebung infolge von Radialbewegung dar, und zwar in Einheiten der Meßschraube. Um diese aber in Kilometern ausgedrückt zu erhalten, sind die Zahlen der Kol 7 mit einem Faktor (Kol 8) zu multiplizieren, der gleichfalls tabuliert ist (Tab 5, Ziff 50). Es ist zu beachten, daß bei diesem zweiten Verfahren dieser Faktor temperaturabhängig ist, also Tafeln für verschiedene Temperaturen berechnet werden müssen.

57 Die Reduktionsmethode von R. H. CURTISS¹ Das Prinzip, welches diesem Verfahren zugrunde liegt, ist das gleiche wie bei den anderen vorstehend auseinandergesetzten Methoden. Das auszuwertende Spektrum wird mit Hilfe des Vergleichsspektrums auf die Dispersion eines Standardspektrums reduziert, welches durch Aufnahme einer Lichtquelle erhalten ist, die keine oder eine genau bekannte Geschwindigkeit besitzt. Die Verschiebung der Sternlinien gegen die Linien des Standardspektrums ist dann der Effekt, der durch die Bewegung des Sternes gegen die Standardlichtquelle erzeugt wird. Der Unterschied gegen die anderen Methoden liegt allein in der Art der Herstellung des Standardspektrums.

CURTISS verfährt folgendermaßen. Neben das Spektrum eines Himmelskörpers, dessen Radialbewegung gut bekannt ist, beispielsweise der Sonne (CURTISS verwendet auch das Spektrum des Himmelslichtes), wird ein Metallspektrum als Vergleichsspektrum, wie auch sonst üblich, aufgenommen. Beide Spektren werden sehr sorgfältig ausgemessen, aber nicht weiter reduziert. Die in Einheiten der Meßschraube ausgedruckten Resultate bilden das Normalspektrum, die „Velocity Standard Table“ (Tab 1), die an Stelle der Reduktionstabellen tritt, welche bei den anderen Verfahren mit Hilfe einer Interpolationsformel gewonnen werden. Die in der ersten Spalte der Tabelle enthaltenen Wellenlängen brauchen nur angenähert, etwa auf $\frac{1}{10}$ bis $\frac{2}{10}$ Å, bekannt zu sein.

Soll nun ein Sternspektrum bearbeitet werden, so wird dieses nebst seinem Vergleichsspektrum (Metallspektrum) ausgemessen, dann werden die Differenzen der Messungen des Vergleichsspektrums gegen die Messungen des Standardspektrums gebildet. Diese Differenzen dienen wie auch bei den anderen Verfahren dazu, das Sternspektrum auf die Dispersion des Normalspektrums zu reduzieren. Am einfachsten ist diese Reduktion wieder durch ein graphisches Verfahren (Zeichnung einer Kurve) auszuführen. Diese Kurve gibt dann die Korrekturen, die an die Sternlinien anzubringen sind, um diese gleichfalls auf das Normalspektrum zu reduzieren. Nach Anbringung dieser Korrekturen geben die Differenzen Normalspektrum minus Sternspektrum bereits die in Einheiten des Schraubenwertes ausgedruckte Radialbewegung des Sterns, bezogen auf die Radialbewegung des als Standard benutzten Himmelskörpers, etwa der Sonne. Um die Radialbewegung in Kilometern ausgedrückt zu erhalten, ist noch die Multiplikation mit einem Umwandlungsfaktor nötig (Tab 1, letzte Spalte, enthält diesen Faktor, und zwar die Zahl der Kilometer pro Revolution der Schraube).

¹ Lick Bull 3, S 19 (1904), Ap J 20, S 149 (1904)

Zur Berechnung dieses Faktors, und nur dazu, ist eine angenaherte Kenntnis der Wellenlangen des Normalspektrums (Tab 1, erste Spalte) nötig. Es genügt in allen Fällen, die Wellenlangen etwa auf $\frac{1}{10}$ Å zu kennen, man kann sie also einem Atlas oder einer Tafel des Sonnenspektrums entnehmen.

Tabelle 1

λ	Stern	Eisen	km
4344,1	45 ^R ,095		1000
4352,0	45 ,611		1010
4360,0	46 ,113		1010
4375,4	47 ,186		1020
4383,7		47 ^R ,765	
4384,5	47 ,814		1030
4395,0	48 ,544		1040
4401,2	48 ,895		1040
4404,9	49 ,161		1050
4404,9		49 ,164	
4415,3		49 ,835	
4415,3	49 ,837		1050
4417,9	50 ,002		1050
4422,8	50 ,308		1060
4443,0	51 ,647		1070
4451,3	52 ,102		1080
4455,4	52 ,397		1080
4462,0	52 ,806		1090
4466,7		53 ,106	
4476,2		53 ,689	
4482,0	54 ,002		1100
4494,7	54 ,806		1110
4494,7		54 ,812	
4501,3	55 ,220		1120
4571,8	59 ,332		1170
4584,0		60 ,012	

Tabelle 2

λ	Stern	Eisen	Korr.	l	V (km)
4352,0	45 ^R ,639		-2	+26	+26
	60,0	46 ,130	-3	+14	+14
	75,4	47 ,213	-3	+24	+24
	83,7				
	84,5	47 ^R ,766			
	95,0	47 ,840	-3	+23	+21
	4401,2	48 ,567	-4	+19	+20
	04,9	48 ,912	-4	+13	+14
	04,9	49 ,188	-4	+23	+24
	15,3				
	15,3	49 ,170			
	17,9	49 ,840			
	43,0		-5	+28	+29
	55,4	49 ,870	-5	+30	+31
	62,0	50 ,037	-5	+21	+22
	76,2	51 ,673	-6	+19	+21
	94,7	52 ,422	-6	+33	+36
	4501,3	52 ,845			
	71,8				
	84,0	53 ,699			
		54 ,815			
			-7	+13	+15
			-4	+14	+16
		60 ,015			

Als Beispiel für das Verfahren sei die Reduktion eines Teiles der Platte 56a von W Sagittarii¹ nach CURTISS gegeben. Die erste Spalte der Tabelle 2 enthält die angenaherten Wellenlangen der Stern- und Eisenlinien, die zweite Spalte die entsprechenden Messungen der Platte in Einheiten der Meßschraube, die dritte die Messungen der Eisenlinien, die vierte die an die Messungen der Sternlinien anzubringenden Korrekturen, durch welche die Platte auf die Velocity Standard Table (Tab 1)² bezogen wird. Sie wurden durch graphische Ausgleichung der Eisenspektren auf den beiden Platten gewonnen. Unter l ist dann die Verschiebung der Linien des Sternspektrums gegen die des Standardspektrums in Einheiten der Meßschraube angeführt. Werden diese Δ mit den Umwandlungsfaktoren (Tab 1, letzte Spalte) multipliziert, so resultiert die unter V stehende Radialbewegung.

Wie ersichtlich, fällt bei dieser Methode die Berechnung einer Interpolationsformel fort, an ihre Stelle tritt eben die Velocity Standard Table. Sind Spektren zu bearbeiten, die bei verschiedenen Temperaturen des Spektrographen erhalten wurden, so genügt diese eine Velocity Standard Table nicht, sondern es sind entsprechende Tafeln für die verschiedenen Temperaturen aufzustellen, ganz ebenso wie bei den früher auseinandergesetzten Verfahren Interpolationsformeln für verschiedene Temperaturen zu berechnen sind. Der Arbeitsaufwand bei der Anwendung der Methode von CURTISS dürfte ungefähr derselbe wie bei den anderen Methoden sein, aber die von CURTISS besitzt gewisse Vorzüge vor den anderen. Die Resultate sind nämlich unabhängig von den Werten der Wellenlangen, da diese bei der Reduktion nicht direkt gebraucht werden, im Gegensatz zu den anderen Verfahren. Die Linien der Vergleichsspektren dienen erstens

¹ Lick Bull 3, S 34 (1904)² Lick Bull 3, S 30 (1904)

dazu, die Dispersion des Sternspektrums der des Standardspektrums gleichzumachen und zweitens eine Koizidenz zwischen den beiden Spektren herzustellen derart, daß die Verschiebung der Sternlinien gegen die Linien des Standardspektrums ohne weiteres den DOPPLER-Effekt darstellen. Eine genaue Kenntnis der Wellenlangen der Linien der Vergleichsspektren ist dazu aber unnötig. Ebensowenig werden die Wellenlangen der Linien des Sternspektrums und des Standardspektrums für die Reduktion gebraucht.

Ein zweiter Vorzug des Verfahrens von CURTISS ist, daß das Auftreten gewisser systematischer Fehler, die bei den anderen Methoden fast unvermeidbar sind, verhindert oder wenigstens die Größe dieser Fehler stark vermindert wird. Hat man die Lage von Absorptionslinien gegen die von Emissionslinien zu messen, so spielen bei der Verschiedenartigkeit der zu messenden Gebilde Auffassungsfehler häufig eine große Rolle. Diese fallen bei dem Verfahren von CURTISS wohl fort, da bei ihm nur gleichartige Gebilde gegeneinander vermessen werden, die Verschiebung der Absorptionslinien des Sternspektrums gegen die Absorptionslinien des Standardspektrums.

Auch diejenigen systematischen Fehler werden nahezu unschädlich gemacht, die dadurch entstehen, daß der optische Teil des Spektrographen nicht ganz fehlerfrei ist oder der Fokus der Kamera bei der Aufnahme nicht ganz richtig eingestellt war. Beide Ursachen wirken sich verschieden aus, je nachdem man es mit Emissions- oder Absorptionslinien zu tun hat. Es entsteht somit ein Fehler, ebenfalls systematischer Art, wenn die Lage von Absorptionslinien gegen die von Emissionslinien, oder umgekehrt, zu vermessen ist. Der Fehler wird gering oder verschwindet ganz, wenn man wie bei CURTISS die gegenseitige Lage von Linien gleicher Art mißt, wenigstens dann, wenn die beiden Platten annähernd die gleichen Schwarzenungen besitzen.

Die Anwendung des Verfahrens von CURTISS ist am zweckmäßigsten für den Fall, daß zahlreiche Spektren ein und desselben Sternes oder von Sternen ein und desselben Spektraltypus auszuwerten sind. Da sich das Sonnenspektrum am besten als Normalspektrum eignet, ist die Reduktion eines Sternes vom Sonnentypus am leichtesten und sichersten auszuführen. Im Prinzip kann man natürlich als Standardspektrum das eines jeden Sternes wählen, wenn nur dessen Radialbewegung bekannt ist, z. B. auch einen Stern vom Typus A, aber die Vorzüge des Verfahrens machen sich am meisten geltend bei Sternen mit linienreichen Spektren.

58 Die Messung und Reduktion von Spektren mit dem Spektrokomparator von HARTMANN¹ Bei der Methode von CURTISS wird, wie oben auseinandergesetzt, das Sternspektrum mittels des Sonnenspektrums reduziert. Die Vergleichsspektren (Metallbogen) auf den Platten des Sonnen- und des Sternspektrums dienen nur dazu, eine Verbindung zwischen beiden letzteren herzustellen, gewissermaßen eine Übertragung des Spektrums der Sonne auf die Platte des Sternspektrums auszuführen. Diese Übertragung läßt sich, wie HARTMANN fand, mit Hilfe optischer und mechanischer Einrichtungen (Spektrokomparator) noch wesentlich vereinfachen, so daß die Arbeit des Messens und Reduzierens erheblich abgekürzt wird und außerdem noch die Genauigkeit steigt.

Das Prinzip, welches dem Verfahren von HARTMANN zugrunde liegt, ist höchst einfach. Durch die Konstruktion des Apparates wird es ermöglicht, je ein Stück des Spektrums der Sonne („Fundamentalspektrum“), des zu messenden Sternes und der beiden Vergleichsspektren gleichzeitig nebeneinander zu sehen (Abb. 25a u. b). Durch Drehen einer Schraube S (Abb. 22 u. 23) bringt man nacheinander das Sternspektrum mit dem danebenliegenden Sonnenspektrum und dann

¹ Ap J 20, S. 338 (1904), 24, S. 285 (1906), Z f Instrk 26, S. 205 (1906), Potsdam Publ 18, Nr. 53, S. 1 (1906).

die Vergleichsspektren der beiden Platten zur Koinzidenz (Zur Herstellung der Koinzidenz der Sonnen- und Sternlinien werden nicht nur gut begrenzte oder symmetrische Sternlinien benutzt, sondern auch breite Gruppen, Kanten von Bandern und selbst die im Negativ dunklen Zwischenräume zwischen Linien) Man bildet hierauf die Differenz der Schraubenablesungen, bei denen diese beiden Koinzidenzen stattfinden, sie entspricht der noch in Schraubenteilen ausgedruck-

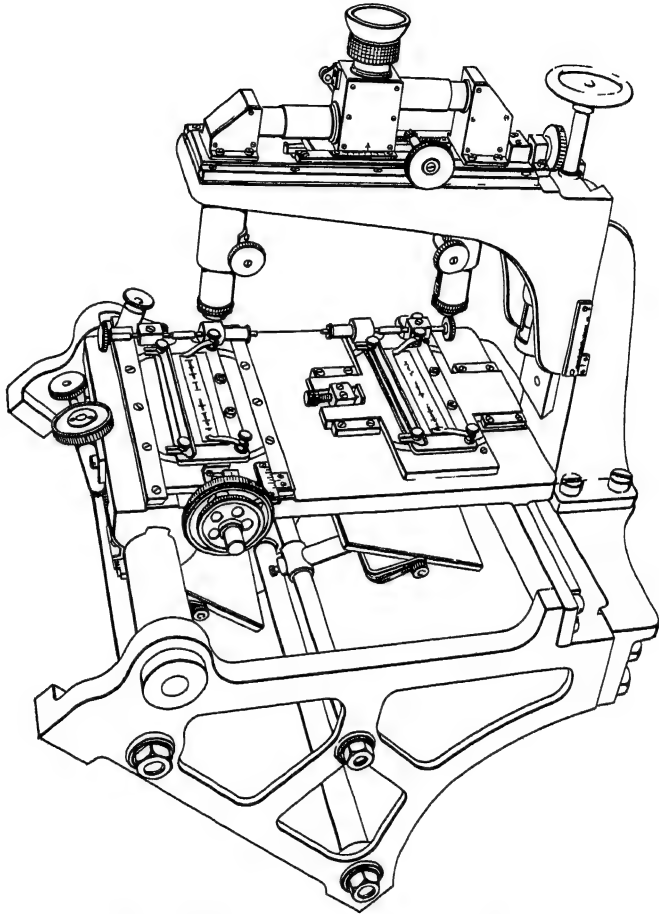


Abb 21 Der Spektrokomparator von HARTMANN

ten Radialgeschwindigkeit Durch Multiplikation der Differenz mit einem Umwandlungsfaktor wird die Radialgeschwindigkeit in Kilometern ausgedruckt erhalten Nachdem ein Stück des Spektrums so vermessen ist, wird ein zweites eingestellt und in gleicher Weise behandelt usw, bis die ganze brauchbare Strecke des Sternspektrums ausgewertet ist Es wird sonach die Radialgeschwindigkeit des Sternes nicht aus einer mehr oder minder großen Zahl einzelner Linien des Spektrums erhalten, sondern aus einigen größeren Stücken des Spektrums mit zahlreichen Linien und Liniengruppen, was eine wesentliche Verkürzung der Meß- und Rechenarbeit bedeutet Es fällt auch die vielfach schwierige und unsichere Identifizierung der einzelnen Linien fort, nur wird vorausgesetzt, daß das Sternspektrum dem Fundamentalspektrum nahe gleicht

Eine genaue Kenntnis der Wellenlängen der Sternlinien sowie der Vergleichslinien ist nicht nötig, da die Wellenlängen nur zur Berechnung des Umwandlungsfaktors gebraucht werden, während bei den anderen Verfahren (außer dem von URUSS) die Radialgeschwindigkeit von der Genauigkeit der Werte der Wellenlängen direkt abhängt.

Dieses Verfahren von HARTMANN eignet sich besonders zur Auswertung linienreicher Spektren, namentlich wenn zahlreiche Platten ein und desselben Sterns (Sterne mit variabler Radialgeschwindigkeit) oder von Sternen desselben

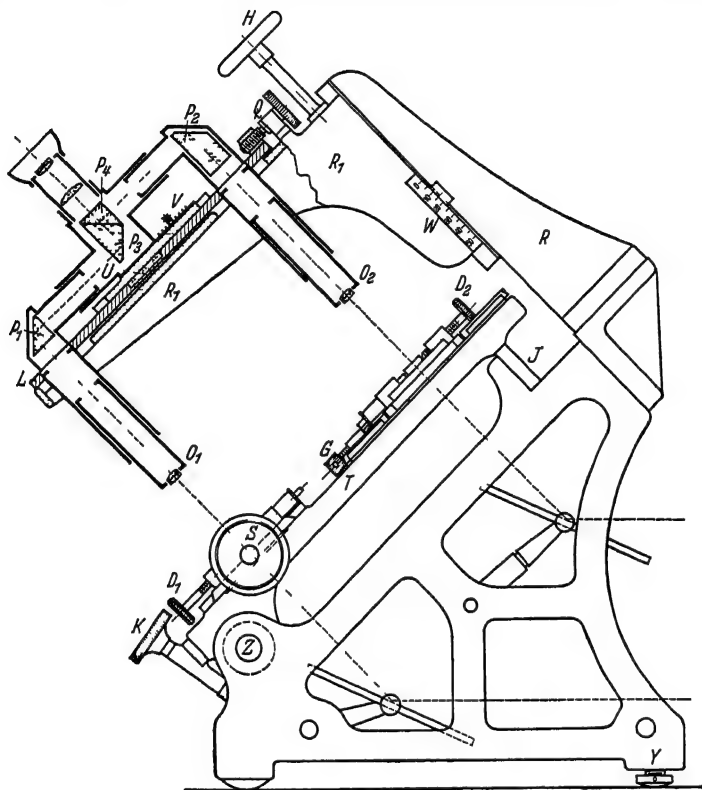


Abb 22 Querschnitt durch den Spektrokomparator

Typus vorhanden sind, d h für differentielle Messungen. Dazu gehört auch die Bestimmung der Sonnenparallaxe aus spektroskopischen Messungen. Der einzige Mangel des Verfahrens besteht darin, daß man über die chemische Zusammensetzung, den Ionisationszustand des Sternes usw nichts erfährt, ferner daß man nicht, wie bei den anderen Verfahren, außer der Radialgeschwindigkeit des Sterns auch noch nachträgliche Korrekturen der Wellenlängen der Sternlinien erhält.

59 Beschreibung des Apparates Eine Gesamtansicht des Apparates gibt Abb 21, einen näheren Einblick in den Bau desselben gewähren die Konstruktionszeichnungen Abb 22, 23, an Hand deren die Beschreibung HARTMANNS¹ wiedergegeben werden soll.

¹ Z f Instrk 26, S 205ff (1906)

„Der Tisch des Meßapparates, auf welchem die beiden zu vergleichenden Spektrogramme befestigt werden, ist in Abb 23 in ein Funftel der natürlichen Größe dargestellt, er enthält die Vorrichtungen zur Justierung der Lage der beiden Platten. Das Sonnenspektrum wird mittels zweier Mikroskopklemmen auf der Platte A_1 befestigt, die zur Beleuchtung des Spektrums einen 1 cm breiten und 12 cm langen Ausschnitt hat. Diese Platte kann zunächst durch die Schraube D_1 und die Gegenfeder F_1 zentrisch um den kurzen Zapfen L_1 gedreht werden, der in der unter A_1 liegenden Platte B_1 gelagert ist. Letztere läuft in den Schwalbenschwanzführungen C und wird auf der Tischplatte T durch die Mikrometerschraube S von rechts nach links verschoben. Die Schraube hat eine Ganghöhe von 0,5 mm, und ihre Trommel ist in 100 Teile geteilt. Zwei lange, unterhalb des Tisches liegende Spiralfedern drücken die Platte B_1

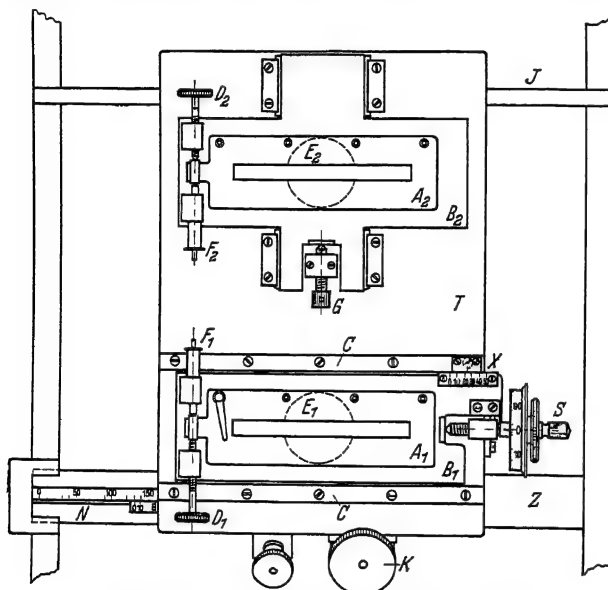


Abb 23 Tisch des Spektrokomparators

gegen die abgerundete, auf einer Achatplatte laufende Spitze der Schraube. Die Zahl der ganzen Schraubenumdrehungen wird bei X an einer 0,5 mm-Teilung abgelesen.

Das auszumessende Sternspektrum wird in gleicher Weise auf der um den Zapfen L_2 drehbaren Platte A_2 befestigt. Die diese tragende Platte B_2 ist mittels der Schraube G von unten nach oben gegen die Tischplatte T verschiebbar, so daß hierdurch der Abstand der beiden Spektrogramme voneinander reguliert werden kann.

Die ganze Tischplatte T ist auf dem 35 mm starken Stahlzylinder Z und auf der ebenen Stahlschiene J um 12 cm von links nach rechts verschiebbar. Die Verschiebung erfolgt mittels einer unterhalb liegenden Zahnstange durch den Knopf K , neben welchem eine Klemme zur Befestigung der Tischplatte in unveränderlicher Stellung vorgesehen ist. Die Stellung des Triebes kann an der 0,5 mm-Teilung N mit Nonius und Lupe abgelesen werden.

Der Tisch T wird in der aus Abb 23 ersichtlichen Weise von seinen Führungen Z und J in einer 45° geneigten Linie getragen. Über ihm erhebt sich der Träger RR_1 eines Doppelmikroskopes, dessen Konstruktion aus dem in Abb 22 gegebenen Durchschnitt zu erkennen ist. Die optischen Achsen der beiden Objektive O_1 und O_2 sind senkrecht auf die beiden auf dem Tische befestigten Spektrogramme gerichtet. Die beiden mit 41 mm langen, durch Zahntrieb verstellbaren Auszügen versehenen Objektivröhre sind in festem Abstand voneinander auf der Platte L befestigt, welche in einer Schwalbenschwanzführung auf der Oberfläche des Trägers R_1 gleitet und durch die Schraube Q um etwa 1 cm verschoben werden kann. Am oberen Ende der beiden Objektivröhre wird der Lichtstrahl durch die rechtwinkligen Prismen P_1 und P_2 nach

dem Prismenkorper P_3P_4 hin reflektiert. In der Berührungsfläche der Prismen P_3 und P_4 findet die Vereinigung der beiden Strahlenbündel in folgender Weise statt:

Auf der Hypotenuse des Prismas P_4 ist eine Fläche von der in Abb 24 durch Schraffierung bezeichneten Form versilbert, und hierauf ist das Prisma mit dem Prisma P_3 verkittet worden, im Okular hat das Gesichtsfeld die durch die Kreislinie umgrenzte Gestalt. Sind die beiden Spektre in der angegebenen Weise unter die Mikroskope O_1 und O_2 gelegt und richtig justiert, so erblickt man, wie Abb 25a u. b zeigen, auf den schraffierten Flächenstücken Teile des Sternspektrums bzw. seines Vergleichsspektrums, während das übrige Gesichtsfeld vom Bilde des unter O_1 liegenden Sonnenspektrums ausgefüllt wird.

Durch die Mitte der Hypothenusenfläche des Prismas P_4 ist noch senkrecht zu den Spiegelstreifen eine feine schwarze Linie (Faden) abgezogen. Sie dient nicht zum eigentlichen Messen, sondern nur zur rohen Markierung der Mitte des Gesichtsfeldes.

Da der Faden 45° gegen die optische Achse des Okulars geneigt ist, so kann immer nur eine kurze Strecke desselben im Gesichtsfelde scharf erscheinen, ebenso wie auch die Begrenzung der beiden seitlichen Spiegelstreifen etwas unscharf erscheinen wird, wenn man das Okular auf den mittleren scharf einstellt. Für die Messungen selbst ist dies ganzlich belanglos, da bei richtiger Beleuchtung der Platten der Beobachter die Spiegel überhaupt nicht sieht, sondern lediglich die in ihnen reflektierten Bilder, die streng in der Einstelebene liegen.

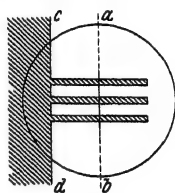


Abb 24 Hypotenuse des Prismas P_4

Der Prismenkorper P_3P_4 ist in einem Kastchen montiert, aus welchem er mit seiner Fassung leicht herausgenommen werden kann, um ihn durch einen anderen zu ersetzen. Hierdurch ist es ermöglicht, nach Belieben verschiedene Formen der Spiegel zu verwenden.

Das den Prismenkorper enthaltende und auch das Okular tragende Kastchen ist auf einem Schlitten befestigt, der durch den Trieb V verschoben werden kann, seine Stellung ist an einer Millimeterenteilung U abzulesen. Nähert man es dem Mikroskop O_1 , so wird dieses verkürzt und seine Vergrößerung also vermindert, während gleichzeitig die Vergrößerung von O_2 verstärkt wird. Durch diese allmähliche Veränderung der relativen Vergrößerung der beiden Mikroskope ist es dem Beobachter ermöglicht, die im Gesichtsfeld erscheinenden Bilder der beiden Spektrogramme so genau gleich groß zu machen, daß sie in ihrer ganzen Ausdehnung gleichzeitig zu scharfen Koinzidenz gebracht werden können.

Es ist endlich noch zu erwähnen, daß der obere Teil R_1 des Mikroskopträgers sich an dem unteren Teile R in einer Schwalbenschwanzführung durch Drehung des Handrades H um 5 cm auf und ab bewegen läßt. Diese Bewegung dient dazu, um die Vergrößerung beider Mikroskope so zu verändern, daß die Breiten dimensionen der Bilder der Spektre genau der gegebenen Breite der Spiegel im Prismenkorper entsprechen, so daß die beiden seitlichen Spiegelstreifen mitten in die Vergleichsspektre zu liegen kommen. Diese Höhenstellung der Mikroskope wird an der Millimeterskala W abgelesen.

60 Vorbereitungen zu den Messungen mit dem Spektrokomparator Die Prüfung des Apparates beschränkt sich auf eine Untersuchung der Meßschraube in bezug auf Fehler periodischer Natur. Da bei den Messungen stets nur Bruchteile einer Schraubenumdrehung benutzt werden, sind fortschreitende Fehler der Schraube ohne Wirkung.

„Zur Erleichterung der Messungen bestimmt man noch einige Konstanten des Apparats, nämlich die Mittelstellungen an den Teilungen N , X und U ,

sowie eine kleine Tabelle für die Höheneinstellung W . Als Mittelstellung N_0 des Tisches wird die bezeichnet, bei welcher sich das Bild des Drehungsmittelpunktes des Zapfens E_2 auf dem Faden befindet. Klemmt man den Tisch in dieser Lage fest und verschiebt dann den Schlitten B_1 mittels der Schraube so lange, bis auch der Drehungsmittelpunkt von E_1 auf dem Faden liegt, so ergibt sich die Ablesung X_0 .

Die Skala U dient zur Einstellung der relativen Vergrößerung der beiden Mikroskope (Bilddehnung). Um die Stellung U_0 , bei welcher beide Vergrößerungen genau gleich sind, zu finden, legt man irgend zwei Platten, auf denen sich ein scharfer Strich befindet, unter die Mikroskope und bringt die Bilder der Striche im Gesichtsfeld durch Drehen der Meßschraube in die Koinzidenzstellung. Bewegt man dann den Tisch auf der Zylinderrführung hin und her, so bleiben die Striche nur dann im ganzen Gesichtsfeld in Koinzidenz, wenn beide Mikroskope gleich stark vergrößern. Bewegt sich die unter O_1 liegende Marke weniger als die andere, so ist ihr Bild weniger vergrößert, das Mikroskop O_1 ist zu kurz, und der Prismenkorper ist daher mittels des Triebes V nach oben, der $+$ -Richtung der Teilung U zu verschieben. Bei dieser Verschiebung wird nun die scharfe Einstellung der Bilder etwas gestört, und man muß dieselbe durch neue Fokussierung der beiden Objektivauszüge berichtigen. Zur Erleichterung dieser auch bei der Ausmessung der Spektren oft wiederkehrenden Verrichtung sind die Zahntriebe dieser Auszüge so angebracht, daß zur Herstellung der scharfen Einstellung diese beiden Triebe immer in derselben Richtung gedreht werden müssen, in welcher man zuvor den Trieb V gedreht hat. Auch merke man sich ein für allemal die Richtung, in welcher diese Drehung von V auszuführen ist. Wenn das Bild des unter O_1 liegenden Spektrums zu klein ist, dann ist der Prismenkorper nach oben hin zu verschieben.

Als letzte Erleichterung der späteren Messungen kann man noch ein Tafelchen herstellen, welches für die verschiedenen Breitendimensionen der Spektren die anzuwendende Einstellung an der Hohenskala W angibt. Die Höhe des Mikroskoptragers R_1 soll bei den Messungen immer so eingestellt werden, daß die beiden äußeren Spiegelstreifen mitten in den Bildern der Eisenspektren liegen. Um diese Einstellung mittels der Skala W rasch zu finden, braucht man nur zu ermitteln, welcher Größe des Objektes diese Spiegeldistanz bei den verschiedenen Ablesungen W entspricht, muß man dann bei dem auszumessenden Spektrum die Distanz der Mitten der Vergleichsspektren, so kann man das entsprechende W unmittelbar einstellen.

Zur Aufstellung des erwähnten Tafelchens legt man eine Zehntelmillimeterteilung, die auf einer Glasplatte von nahe derselben Dicke wie die auszumessenden Spektrogramme angebracht ist, auf die Platte A_1 , so daß die Teilstiche horizontal liegen. Während die Bilddehnung dauernd auf U_0 eingestellt bleibt, stellt man der Reihe nach die verschiedenen Ablesungen der Skala W ein, fokussiert jedesmal scharf mit dem Objektivauszug und schätzt die Distanz der Mitte der beiden äußeren Spiegel nach der Skala ein.

61 Die Messungen selbst „Auf der Platte des Sonnenspektrums (Fundamentalspektrum) bezeichnet man durch dicht neben das Eisenspektrum gesetzte Punkte eine Anzahl von Stellen und numeriert dieselben in der aus Abb 25a u b ersichtlichen Weise. Diese Stellen werden so ausgewählt, daß sich, sobald der Punkt auf den Faden gebracht wird, eine Anzahl guter Linien des Eisenspektrums zu beiden Seiten des Fadens auf den Spiegelstreifen befinden. Für die so bezeichneten Punkte des Spektrums berechnet man die Geschwindigkeitsfaktoren s , d h diejenigen Geschwindigkeiten, welchen an den betreffenden Stellen eine Linienverschiebung um 1^R der Meßschraube entspricht.

Die Ausmessung eines Sternspektrums findet nun folgendermaßen statt. Man stellt den Wert von W und die Bilddehnung U_0 ein. Ist X die zufällige Stellung der Meßschraube, so schiebt man den Tisch auf die Ablesung $N = N_0 - X_0 + X$, in dieser Stellung befindet sich die Achse des Zapfens E_1 auf dem Faden. Dann befestigt man das Fundamentalspektrum auf der Platte A_1 , als Lage I ist diejenige bezeichnet, in welcher die größeren Wellenlängen rechts liegen, im Mikroskop also links erscheinen. Man stellt das Okular scharf auf den mittleren Spiegelstreifen ein und bringt dann mit dem Objektivauszug O_1 das Bild der Platte zur scharfen Einstellung. Dann stellt man mit der Schraube Q den mittleren Spiegel genau auf die Mitte des Fundamentalspektrums, schiebt den Tisch mittels des Triebes K bis an das Ende des Spektrums und stellt dieses durch die Schraube D_1 wieder wie vorher symmetrisch zum Spiegel. Hiermit ist das Fundamentalspektrum parallel zur Zylinderführung gerichtet und seine Justierung beendet. Fast ebenso einfach ist die Justierung des Sternspektrums. Man befestigt dasselbe auf der Platte A_2 und schiebt es hierbei gleich so, daß dieselbe Stelle des Spektrums im Gesichtsfelde erscheint wie vom Fundamentalspektrum. Man stellt das Objektiv O_2 scharf ein, bringt den Tisch in die Mittellage N_0 und verschiebt nun mittels der Schraube G das Sternspektrum so lange, bis es in gleicher Höhe mit dem Fundamentalspektrum im Gesichtsfelde erscheint. Man richte sich hierbei nur nach den Eisenlinien beider Platten und vergleiche sie nahe bei der Trennungslinie cd in Abb 24. Dann schiebt man den Tisch wieder seitwärts ans Ende der Spektra und stellt durch die Schraube D_2 die gleiche Höhenlage abermals her. Hierdurch ist auch das Sternspektrum der Zylinderführung parallel gerichtet.

Sodann ist die Bilddehnung mittels des Triebes V so einzustellen, daß die beiden Spektra im Gesichtsfelde genau gleich groß erscheinen.

Ist das Sternspektrum, wie es häufig der Fall ist, nicht in seiner ganzen Breite gleichmäßig belichtet, so verschiebt man endlich mittels der Schraube Q

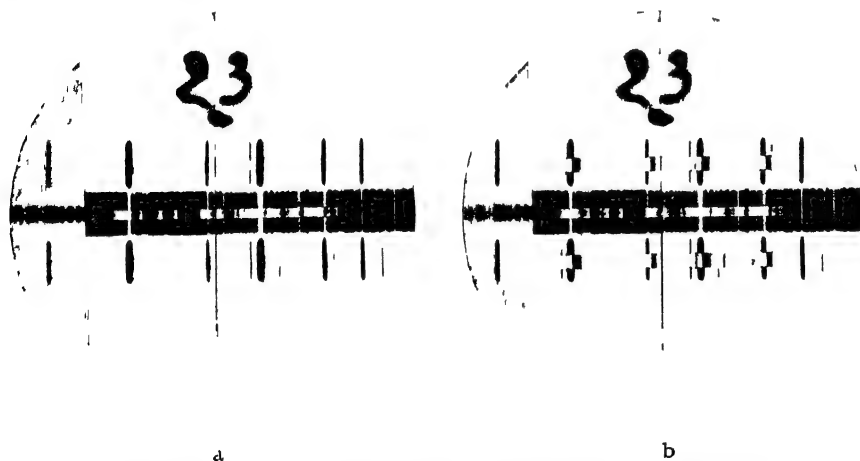


Abb 25 a u b Messung eines Spektrogrammes im Spektrokomparator

die Mikroskope so, daß der mittlere Spiegelstreifen die schönste Stelle aus dem Sternspektrum aufnimmt.

Die eigentliche Messung besteht nun lediglich darin, daß man, während sich einer der numerierten Punkte auf dem Faden befindet, durch Drehen der Meßschraube S nacheinander das Sternspektrum mit dem nebenliegenden Funda-

mentalspektrum und dann die Eisenspektren zur Koinkidenz bringt, wie dies aus Abb 25a u b zu ersehen ist. Da die Spektren in ihrer ganzen im Gesichtsfeld sichtbaren Länge genau koinkidieren, so erkennt man auf einen Blick, welche Linien in beiden gemeinsam und zur Herstellung der Koinkidenz zu verwenden sind.

Hat man das Spektrum in der Lage I ausgemessen, so dreht man dasselbe und auch das Fundamentalspektrum um 180° und wiederholt die Messung in der Lage II. Hierdurch werden die von der Lage abhängigen psychophysischen Fehler eliminiert. Gleichzeitig mit diesen eliminiert man nun hierbei auch den geringen Einfluß des periodischen Schraubenfehlers auf das Resultat. Man hat zu diesem Zweck nur darauf zu achten, daß die Messung in der Lage II bei einer um 180° verschiedenen Schraubenablesung gemacht wird.“

62. Reduktion der Messungen HARTMANN erläutert die Reduktion der Messungen an einem Beispiel, das in der Hauptsache gleichfalls hier reproduziert werden soll.

Platte III 775 α Bootis 26 Mai 1905, 9^h 44^m MEZ Fundamentalspektrum III 758
Marke 13 λ 4606, Marke 34 λ 4070

Marke	Lage I			Lage II			$\frac{d_1 + d_2}{2}$	s	$V_* - V_0$
	Fe	*	d_1	Fe	*	d			
13	27 ^R ,403	27 ^R ,382	+0 ^R ,021	27 ^R ,876	27 ^R ,901	+0 ^R ,025	+0 ^R ,023	479	+11,0km
14	,406	,380	26	,875	,899	24	25	465	11,6
15	,404	,377	27	,876	,900	24	25	450	11,5
16	,408	,376	32	,869	,898	29	30	437	13,3
17	,410	,380	30	,873	,902	29	29	422	12,4
18	,413	,385	28	,870	,900	30	29	407	11,8
19	,423	,395	28	,862	,891	29	28	396	11,3
20	,424	,392	32	,860	,886	26	29	383	11,1
21	,427	,389	38	,856	,888	32	35	373	13,1
22	,427	,398	29	,856	,889	33	31	361	11,2
23	,426	,393	33	,853	,882	29	31	349	10,8
24	,427	,392	35	,852	,885	33	34	337	11,5
25	,427	,388	39	,857	,889	32	35	326	11,6
26	,423	,390	33	,857	,888	31	32	315	10,1
27	,426	,385	41	,855	,893	38	39	304	12,0
28	,423	,380	43	,858	,893	35	39	294	11,5
29	,424	,386	38	,857	,892	35	36	285	10,4
30	,426	,380	46	,856	,900	44	45	275	12,4
31	,421	,373	48	,856	,905	49	48	266	12,9
32	,421	,378	43	,859	,900	41	42	259	10,9
33	,424	,380	44	,855	,898	43	43	252	11,0
34	,430	,377	53	,852	,895	43	48	244	11,7
								Mittel	+11,60

Die vier mit Fe und * überschriebenen Spalten enthalten die bei der Messung niedergeschriebenen Schraubenablesungen. Man bildet daraus den Betrag der Linienverschiebung, nämlich

$$\text{in Lage I} \quad d_1 = \text{Fe} - *,$$

$$\text{in Lage II} \quad d_2 = * - \text{Fe}$$

Die Spalte $\bar{d} = \frac{d_1 + d_2}{2}$ gibt die Mittel der Verschiebung in Teilen der Meßschraube. Mit Hilfe der Umwandlungsfaktoren s werden die \bar{d} in Kilometer verwandelt. Die Spalte $V_* - V_0$ enthält die gesuchten Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Stern und Fundamentalspektrum.

Als Fundamentalspektrum diente ein Sonnenspektrum (16 Mai 1905). Da die Komparatormessung den Unterschied der Geschwindigkeiten von Stern und

Sonne liefert, muß die Geschwindigkeit der Sonne für das Fundamentalspektrum bekannt sein. Man berechnet sie am einfachsten aus den in den astronomischen Ephemeriden gegebenen Werten des Radiusvektors, da diese schon alle Störungen enthalten. Hierzu kommt noch die Komponente der Erdrotation. Die Summe dieser beiden Korrekturen beträgt im vorliegenden Fall $+0,31$ km, so daß sich V_* zu $+11,91$ km ergibt. V_* ist somit die wahre Radialgeschwindigkeit des Sterns gegen den Beobachter. Die Reduktion ($-16,65$ km) von V_* auf die Sonne wird in der üblichen Weise berechnet und angebracht, so daß sich für die Radialgeschwindigkeit von α Bootis, bezogen auf die Sonne, schließlich ergibt $V = -4,74$ km.

Der Spektrokomparator eignet sich übrigens auch sehr zu vergleichenden Studien über die Spektren verschiedener Sterne.

1) Systematische Fehler bei der Reduktion von Sternspektrogrammen

63 Einleitung Die Reduktion der Messungen eines Sternspektrums verläuft, in wenigen Worten ausgedrückt, in folgender Weise. Aus den Messungen der Vergleichsspektrumlinien wird eine Beziehung abgeleitet zwischen diesen Messungen und den etwa in einem physikalischen Laboratorium bestimmten Wellenlängen dieser Linien (Interpolationsformel). Mittels dieser Beziehung werden dann aus den Messungen der Sternspektrumlinien die Wellenlängen dieser Linien berechnet und diese Wellenlängen dann mit den Wellenlängen der entsprechenden Linien des Sonnenspektrums verglichen. Es wird also vorausgesetzt, daß die Linien des Sterns identisch mit denen der Sonne sind. Aus der Differenz der Wellenlängen zwischen Sonnenlinien und Sternlinien folgt dann die Radialgeschwindigkeit des Sterns, bezogen auf die Sonne (Die Radialgeschwindigkeit, die sich unmittelbar aus den Messungen ergibt, ist die des Sterns gegen die Erde, die Reduktion auf die Sonne wird aus den bekannten Elementen der Erdbewegung berechnet und angebracht). Bei dieser Auswertung der Messungen des Sternspektrums können nun systematische Fehler verschiedener Art entstehen. Diese sollen hier besprochen werden.

64 Fehler der Wellenlänge einer einzelnen Linie. Zunächst können die Wellenlängen einzelner Linien sowohl des Vergleichs- als auch des Sonnenspektrums größere zufällige Fehler besitzen. Die Fehler der ersteren Linien werden bereits bei der Ableitung der Interpolationsformel bemerkt und durch eine passende Ausgleichung beseitigt. Fehler einzelner Wellenlängen der Sonnenlinien bewirken, daß die Radialgeschwindigkeit aus diesen Linien gegen die Radialgeschwindigkeiten aus den anderen Linien größere Abweichungen zeigt, so daß das Mittel der Radialgeschwindigkeiten aus sämtlichen Linien systematisch gefälscht wird. Das ist besonders dann der Fall, wenn das Sternspektrum nur wenige Linien enthält. Beispielsweise beeinflusste eine falsche Wellenlänge der $H\delta$ -Linie im Sonnenspektrum die Radialgeschwindigkeiten der Sterne, die fast nur die Linien des Wasserstoffes enthalten, worauf CAMPBELL hingewiesen hat.

Der Fehler in der Wellenlänge einer solchen Linie läßt sich nun aus einer großen Anzahl von Spektren desselben Sterns oder von Sternen desselben Spektraltypus folgendermaßen bestimmen. Es wird die Radialgeschwindigkeit unter Ausschluß der Linie mit der fehlerhaften Wellenlänge berechnet und die Differenz zwischen dieser Radialgeschwindigkeit und der Radialgeschwindigkeit, die mit der fehlerhaften Wellenlänge berechnet ist, gebildet. Ist eine große Anzahl von Spektren gemessen worden, so wird das Mittel dieser Differenzen als frei von zufälligen Fehlern angesehen werden können, so daß es zur Kor-

rektion der Wellenlänge der fehlerhaften Linie benutzt werden kann. Die Wellenlänge dieser Linie ist dann in jeder einzelnen Aufnahme um den Betrag zu korrigieren, der aus obiger Differenz folgt. Wenn dann wieder das Mittel der Radialgeschwindigkeiten aller Linien einer jeden Platte von neuem gebildet wird, so ist dieses Mittel nun frei von dem systematischen Fehler, der durch die falsche Wellenlänge der Spektrallinie entstand. In dieser Weise ist z. B. HARTMANN¹ vorgegangen.

65 Fehler des Wellenlangensystems Weiterhin kann das Wellenlangensystem des Vergleichsspektrums vom Wellenlangensystem der Sonnenlinien abweichen. Bei der Reduktion der Sternlinienmessungen mit Hilfe des Vergleichsspektrums (z. B. Fe) werden die Wellenlängen der Sternlinien im System der Vergleichslinien gefunden. Weicht dieses System von dem der Sonnenlinien ab, so werden die Differenzen der Sternlinien gegen die Sonnenlinien systematischen Charakter aufweisen und dadurch wird auch die Radialgeschwindigkeit systematisch verfälscht sein. Dieser Fehler durfte sehr vielen Radialgeschwindigkeiten anhaften, die bis zur Revision der Preliminary Table ROWLANDS bestimmt worden sind. Als Vergleichsspektrum wurde damals nämlich fast allgemein das Spektrum des Eisens benutzt, dessen Wellenlängen von KAYSER² zwar im Anschluß an das System ROWLANDS bestimmt worden sind, aber nicht streng dem System von ROWLAND entsprechen. (Eine ausführliche Diskussion des Verhältnisses zwischen den KAYSERSchen Wellenlängen des Eisenspektrums und dem System von ROWLAND ist von HARTMANN³ gegeben worden, auf welche hier hingewiesen werden soll, da eine ausführliche Darstellung der Untersuchungen von HARTMANN hier zu weit führen würde.) Wurden die Linien des Sternspektrums nach der Preliminary Table of Solar Spectrum Wave-Lengths (P. T.) identifiziert und ihre Wellenlängen aus der P. T. entnommen, während für die Vergleichsspektrumlinien die KAYSERSchen Tafeln benutzt wurden, so werden alle Radialgeschwindigkeiten, die auf diese Weise bestimmt sind, einen systematischen Fehler besitzen, dessen Betrag von der Größe des Unterschiedes der beiden Systeme abhängt. Eine Befreiung der Radialgeschwindigkeiten der früheren Bestimmungen konnte nur durch eine Neureduktion aller Messungen unter Anwendung der „Revision of ROWLAND's Preliminary Table of Solar Spectrum Wave-Lengths“ (R. P. T.), Washington 1928, erhalten werden, deren System dasselbe ist wie das der jetzt gebräuchlichen Wellenlangentafeln der Elemente (System I A.⁴)

66 Fehler bei der Linienidentifizierung Der schwierigste und unsicherste Teil der Bestimmung von Radialgeschwindigkeiten ist die Identifizierung der Sternlinien mit den Linien der chemischen Elemente. Man geht dabei so vor, daß man aus einigen ohne weiteres identifizierbaren Linien, z. B. denen des Wasserstoffes, die Radialgeschwindigkeit angenähert ableitet, mit dieser dann die Wellenlängen der nicht bekannten Sternlinien verbessert und unter Benutzung von Wellenlangentafeln nachsucht, welchem Elemente diese Linien angehören können. Ist die Identifizierung auf diese Weise gelungen, so sind dann die Wellenlängen genau bekannt, und es wird dann die Radialgeschwindigkeit aus einer jeden Sternlinie gerechnet und das Plattenmittel der Radialgeschwindigkeit gebildet. Hierauf wird geprüft, ob die Identifizierung für alle Linien richtig ausgeführt worden ist, d. h. ob die Radialgeschwindigkeiten der

¹ A. N. 155, S. 112 (1904)

² Ann. d. Phys. (4) 3, S. 195 (1900), Ap. J. 13, S. 329 (1904), Handb. der Spektroskopie 6, S. 891 (1912)

³ Ap. J. 18, S. 167 (1903), 20, S. 41 (1904), Astr. Mitt. Göttingen 19 (1916)

⁴ Man vgl. hierzu und zum folgenden Transactions of the International Astronomical Union I, S. 35 ff. (1922), II, S. 40 ff. (1925), III, S. 77 ff. (1928), IV, S. 58 ff. (1933), ferner Abschnitt 3 dieses Bandes

einzelnen Linien genügend genau mit dem Mittelwert der Platte übereinstimmen. Für diejenigen Linien, die zu stark vom Plattenmittel abweichen, wird das Verfahren wiederholt, bis genügende Übereinstimmung erreicht ist.

Früher, als erst Wellenlangentafeln nur weniger Elemente vorhanden und die Angaben außerdem mit starken Unrichtigkeiten zufälliger oder systematischer Art behaftet waren, war man für die Identifizierung ausschließlich auf die P. T. ROWLANDS angewiesen. Diese Art der Identifizierung ist aber ebenfalls eine Quelle systematischer Fehler gewesen, denn es ist zweifelhaft, ob die Bedingungen, unter denen eine Absorptionslinie auf der Sonne entsteht, identisch mit denen auf den Sternen sind. Die Annahme einer Gleichheit der physikalischen Verhältnisse auf der Sonne und den Sternen gilt wohl nur für Sterne mit einem sonnenähnlichen Spektrum, d. h. für Sterne vom Spektraltypus G, und für diese kaum in voller Strenge, da z. B. auch die absolute Helligkeit des Sternes in Betracht kommt (Riese, Zwerg). Außer der Temperatur werden eben noch Druck, chemische Zusammensetzung, DOPPLER-Effekte, STARK-Effekte usw. Veränderungen in den Werten der Wellenlängen erzeugen können¹. Jedenfalls ist die Berechtigung für die Annahme einer Gleichheit der Wellenlänge in der Sonne und in dem Stern durch spezielle Untersuchungen nachzuweisen, wenn von systematischen Fehlern dieser Art freie Radialgeschwindigkeiten erhalten werden sollen.

Unter diese Gattung von systematischen Fehlern fallen auch die, welche durch die verschiedenen physikalischen Bedingungen, unter denen das Vergleichsspektrum erzeugt wird, entstehen. So kann z. B. die Radialgeschwindigkeit eines Sternes bis zu einem gewissen Betrag verschieden ausfallen, je nachdem als Vergleichsspektrum der Eisenbogen oder ein auf andere Art (Vakuumbogen, PFUND-Bogen) erzeugtes Vergleichsspektrum benutzt wird. Um vergleichbare Werte für die auf verschiedenen Observatorien bestimmten Radialgeschwindigkeiten zu erhalten, ist eine internationale Festsetzung über die Art der Erzeugung des Vergleichsspektrums nötig. Ein solcher Vorschlag ist bereits gemacht worden². „In order to obtain lines of constant wave-length, constant intensity distribution and adapted to high orders of interference, the adoption is recommended of the Pfund arc [Ap J 27, S 297 (1908)] operated between 110 and 250 volts, with 5 amperes or less, at a length of 12 to 15 millimetres used over a central-zone at right angles to the axis of the arc, not to exceed 1 to 1,5 millimetres in width, and with an iron rod 6 to 7 millimetres diameter as the upper pole and a bead of oxide of iron as the lower pole.“ Leider ist die Handhabung des PFUND-Bogens mit experimentellen Schwierigkeiten verbunden, so daß man ihn wohl schwerlich in Verbindung mit einem Sternspektrographen verwenden kann. Es bleibt also nichts übrig, als aus dem gewöhnlichen Eisenbogen eine Anzahl geeigneter Linien auszusuchen, diese im Laboratorium an den PFUND-Bogen anzuschließen und so das Sternspektrum auf indirektem Wege auf den PFUND-Bogen zu beziehen.

Nun kommt aber noch eine weitere sehr große Schwierigkeit für die Identifizierung der Sternlinien zu den obengenannten hinzu. Sowohl die Sonne als

¹ Die Wellenlänge einer Linie oder Liniengruppe ist bis zu einem gewissen Betrag abhängig von der Höhe der Schicht, in welcher die Absorption stattfindet. Nach den Werten MITCHELLS [Ap J 38, S 407 (1913)] für die Höhe in der Chromosphäre, bis zu welcher einzelne Linien hinaufreichen, ist die mittlere Höhe der Schicht in der Sonne für 49 vielgebrauchte Linien etwa 583 km. Die mittlere Höhe der Schicht für 47 Linien, die bei der Reduktion der Spektrogramme von η Aquilae und ζ Gemminorum verwendet wurden, ergab sich nach S. TH. JACOBSEN [Lick Bull 12, S 140 (1926)] zu 580 km, das ist also ein Wert, der nur wenig von der mittleren Höhe der Schicht abweicht, in der die entsprechenden Linien in der Sonne entstehen.

² Transactions of the International Astronomical Union I, S 36 (1922).

auch die Sterne der Spektraltypen F bis N besitzen zahlreiche so eng benachbarte Linien, daß das Spektrogramm infolge der kleinen Dispersion der Sternspektrographen diese Linien nicht mehr einzeln, sondern in eine Linie zusammengewachsen zeigt. Meist sind gerade die ausgeprägtesten, am sichersten zu messenden Sternlinien nicht einfache Linien, sondern Liniengruppen (blends), die der Spektrograph als eine einzelne Linie erscheinen läßt, während sie bei der großen Dispersion in den Darstellungen des Sonnenspektrums sich in eng benachbarte Linien auflösen. Die Identifizierung dieser Gruppen und die Feststellung der Wellenlänge einer solchen Gruppe im Sternspektrum ist meist sehr schwierig und setzt große praktische Erfahrung voraus. Man ist gezwungen, Versuche zu machen, ob eine Sternlinie eine mit der vorläufig bestimmten Radialgeschwindigkeit besser harmonisierende Radialgeschwindigkeit gibt, wenn man sie als einfache Linie oder als Liniengruppe auffaßt, so daß in zahlreichen Fällen eine gewisse Willkür bei der Identifizierung nicht zu vermeiden ist. Besteht die Linie im Sternspektrum aber aus einer Gruppe, so ist es noch zweifelhaft, welche Wellenlänge man ihr zuweisen soll. Der beste Weg zur Entscheidung dieser Frage ist auch heute noch der, daß man nachsieht, welche Linien im Sonnenspektrum die betreffende Gruppe bilden und bei der Mittelbildung der Wellenlänge aus den einzelnen Linien der Wellenlänge einer jeden dieser einzelnen Linien die Intensitätszahlen der P. T. ROWLANDS bzw. die der R. P. T. als Gewichte beilegt¹. Beispielsweise ergeben die Linien

4592,707 Ni, Intensität 2

4592,840 Fe, Intensität 4

als gewichtetes Mittel 4592,796. Die Übereinstimmung der Radialgeschwindigkeit aus der so berechneten Wellenlänge mit der aus anderen Linien folgenden Radialgeschwindigkeit ist das Kriterium dafür, daß die Mittelbildung in richtiger Weise vorgenommen worden ist. Für Sterne vom Sonnentypus oder von einem nahe benachbarten Spektraltypus führt dieser Weg meist zum Erfolg. Sobald aber Sterne anderer Typen vorliegen, können Fehler entstehen, selbst wenn die betreffende Gruppe aus denselben Einzellinien wie in der Sonne besteht, denn die Intensitäten dieser letzteren sind für die verschiedenen Spektraltypen nicht die gleichen. Weiterhin brauchen die zu einer Linie im Sternspektrum zusammenfließenden Linien nicht einmal dieselben wie in der Sonne zu sein, es können in einem Stern eines anderen Spektraltypus noch Linien zur Gruppe hinzukommen oder aus ihr verschwinden, die in der Sonne nicht oder in ganz anderen Intensitäten vorhanden sind. Es entstehen somit auch hierdurch Fehler, die einen systematischen, vom Spektraltypus abhängigen Charakter besitzen. Außer dem Spektraltypus kann auch die absolute Helligkeit des Sternes von Einfluß sein, d. h. seine sonstige physikalische Beschaffenheit. Dieselbe Liniengruppe kann in einem Zwerg eine andere Wellenlänge haben als in einem Riesen desselben Spektraltypus, weil die die Gruppen bildenden Linien andere Intensitäten in dem Zwerg haben können als in einem Riesen. Es kommt hinzu, daß die Wellenlänge einer solchen Gruppe auch noch von der Stärke der Exposition des Spektrogramms abhängt, indem schwache, einseitig liegende Begleiter starker Linien bei kraftiger Exposition verschwinden, sich aber bei schwacher Exposition bemerkbar machen und somit die Wellenlänge der Gruppe beeinflussen. S. TH. JACOBSEN² fand bei verschiedenen lang exponierten Platten ein und desselben Sternes Änderungen der Radialgeschwindigkeit im Betrage von 2 bis 3 km bei so beschaffenen Gruppen. Auch KÜSTNER³ machte diese Erfahrung. Besonders

¹ J. HARTMANN, A. N. 155, S. 104 (1901)

² Lick Bull. 12, S. 139 (1926)

³ A. N. 169, S. 245 (1905)

unübersichtlich gestalten sich die Verhältnisse für die Sterne, die neben Linien auch noch Banden besitzen

S ALBRECHT¹ hat sich in mehreren Arbeiten eingehend mit der Änderung der Wellenlänge in Abhängigkeit vom Spektraltypus beschäftigt, und wenn auch seine Untersuchungen noch nicht abgeschlossen sind, hat er doch bereits reiches und wertvolles Material über diese Frage beigebracht. Als Beispiele seien nach S ALBRECHT folgende Sternlinien angeführt, die eine solche systematische Verschiebung in Abhängigkeit vom Spektraltypus zeigen

λ P I	Element	Intensität Sonne	Intensität Sonnenfleck	ΔRG	Spektral typus
4258,219	Fe+Zr+	1 N	—	— 3,6 km	F
4258,477	Fe	2	3—4	+ 4,1 + 5,0	K Mb
4352,908	Fe	4	} 7—8	— 1,0 km	F8 G
4353,044	V	0		+ 0,8 + 2,2 + 3,0 + 4,7	G—G5 K K2—K5 Mb
4416,636	V	0		+ 0,6 km	F
4416,985	Fe+	2		+ 1,3 — 16,3	K Mb
4390,149	V	2	5	— 3,2 km — 2,7 — 0,4 + 1,3	G K K5 Mb
4468,663	Ti+	5	3	— 2,1 km — 1,0 — 0,9 + 0,2 + 1,3 + 4,3 + 4,7	F F8 G G5 K K5 Mb

Es ist aus den drei ersten Beispielen deutlich zu sehen, daß die Wellenlänge der Gruppe dadurch eine Verschiebung entsprechend dem Spektraltypus erleidet, daß eine Einzellinie oder aber beide ihre Intensität ändern, daß also eine Mittelbildung für die Wellenlänge der Gruppe unter Annahme der Intensitäten der P T als Gewichte nicht erlaubt ist für Sterne aller Spektraltypen. Dasselbe scheint auch für die Linie 4468,663 zu gelten. Neben ihr liegt nämlich, um 0,25 Å nach längeren Wellen zu, eine in der Sonne schwache Vanadiumlinie. Diese ist in den Sonnenflecken stärker als in der Sonne selbst, nimmt also an Intensität zu bei den späteren Typen, während die Linie des Ti⁺ in den Sonnenflecken schwächer als in der Sonne selbst ist, bei späteren Typen somit wahrscheinlich noch weiter an Intensität verliert. Aus der Intensitätsvariation dieser beiden Linien läßt sich daher der Gang ΔRG in den Radialgeschwindigkeiten zwanglos erklären. Dieser Fall zeigt besonders deutlich, wie vorsichtig bei der Identifizierung vorzugehen ist. Unklar liegen die Verhältnisse bei der Linie 4390,149. Hier scheint eine Erklärung der Wellenlängenänderung durch benachbarte Linien nicht möglich zu sein. Die Linie gehört zu den stärksten Linien des Vanadiums, ihre Intensität ist in den Sonnenflecken erheblich größer als in der Sonne selbst.

¹ Boletín Cordoba Obs. Nr. 1, Lick Bull. 4, S. 90 (1906), Ap J 24, S. 333 (1906), 40, S. 277 (1918). Man vgl. auch hierzu noch J. VOÛTE, On Changes of the Wave-lengths of Certain Lines in Stellar Spectra Depending upon the Type, Ap J 47, S. 137 (1918), S. TH. JACOBSEN, Lick Bull. 12, S. 139 (1926).

Im Funken ist diese Linie nach EXNER und HASCHECK umgekehrt. Es ist möglich, daß die Wellenlängenänderung durch eine Änderung des Aussehens der Vanadiumlinie erzeugt wird.

Die Aufgabe der Linienidentifizierung in den Fällen, in welchen eng benachbarte Linien zu einer Gruppe (blend) in den Spektren zusammenwachsen, welche mit einem der üblichen Sternspektrographen erhalten werden, wird erst dann restlos gelöst werden können, wenn die Spektren der hellsten Sterne der verschiedenen Typen mit einem Spektrographen aufgenommen worden sind, dessen Dispersion mit der der P T vergleichbar ist, eine Arbeit, die auf dem Mt Wilson Observatory mit Erfolg begonnen wurde. Bis diese Untersuchung beendet ist, sind die Identifizierungen mit Hilfe der R P T vorzunehmen, die vollkommener als die P T ist, außerdem sind die Resultate der Untersuchungen von S ALBRECHT zu verwenden. Auch die neueren spektroskopischen Arbeiten, speziell

die über die Serien in den Spektren der Elemente sowie die Ionisationstheorie können vielfach Hinweise geben, wie eine Identifizierung möglich und vorzunehmen ist.

Hat man zahlreiche Spektrogramme entweder eines einzelnen Sternes oder von mehreren Sternen desselben Typus, so kann man empirisch eine Korrektur für die für eine Liniengruppe angenommene Wellenlänge herleiten, indem man die Radialgeschwindigkeiten, die die betreffende Gruppe gibt, mit der Radialgeschwindigkeit der Plattenmittel vergleicht. Stimmen beide innerhalb der erreichbaren Genauigkeit überein, so ist das ein Zeichen dafür, daß die Wellenlänge der Gruppe richtig angenommen worden ist. Man verfährt also für eine Liniengruppe in gleicher Weise wie für eine einzelne Linie, wie bereits oben auseinandergesetzt wurde.

67 Wellenlängen für die Linien der O- und B-Sterne

Besondere Schwierigkeiten bietet die Identifizierung der Spektrallinien bei den Sternen der Spektralklassen O und B, da das Sonnenspektrum, das man meist zur Identifizierung benutzt, die Linien dieser Sterne nicht enthält. Man ist gezwungen, die Wellenlängen dieser Linien Laboratoriumsmessungen zu entnehmen, welche aber in sehr zahlreichen Einzelveröffentlichungen zerstreut sind und daher mit Mühe zusammengesucht werden müssen. Auf Wunsch der Internationalen Astronomischen Union hat I A PEARCE auf sehr sorgfältigem Wege eine Liste der hauptsächlich vorkommenden Linien der O- und B-Sterne zusammengestellt, welche in den Transactions der I A U 4, S 187, veröffentlicht ist und ihrer großen Zweckmäßigkeit wegen nebenstehend abgedruckt wird.

Primäre Standards		Sekundäre Standards	
λ	Atom	λ	Atom
3933,664	Ca II	4009,27	He I
64,727	He I	4153,304	O II
68,465	Ca II	68,97	He I
70,075	H	4351,270	O II
94,996	N II	79,100	N III
4026,189	He I	4510,906	N III
69,794 ¹	O II	14,861	N III
72,162	O II	23,59	N III
75,868	O II	4634,145	N III
88,863	Si IV	38,857	O II
97,330	N III	40,632	N III
4101,738	H	41,873	N III
03,394	N III	49,141	O II
16,104	Si IV	50,844	O II
19,221	O II	51,46	C III
20,812	He I		
28,053	Si II		
30,884	Si II		
43,759	He I		
4267,16 ²	C II		
4317,144	O II		
19,635	O II		
40,466	H		
49,428	O II		
87,928	He I		
4414,904	O II		
16,975	O II		
37,549	He I		
71,477	He I		
81,228 ³	Mg II		
4541,61	He II		
52,654	Si III		
67,872	Si III		
74,777	Si III		
90,974	O II		
96,178	O II		
4685,74	He II		
4713,143	He I		
4861,327	H		
4921,929	He I		

¹ blend 4069,636 (4) + 4069,899 (6) O II

³ blend 4481,327 (1) + 4481,129 (1) Mg II

² blend 4267,27 (10) + 4267,02 (8) C II

Es ist zu dieser Tabelle zu bemerken, daß die Wellenlangen der Stern- und Vergleichslinien auf Laboratoriumsmessungen basiert sind, die Radialgeschwindigkeiten also nicht homogen sein können mit denen, die auf die Linien des Sonnenspektrums bezogen sind. Zwischen den Wellenlangen der Revised ROWLAND Table und den Laboratoriumsmessungen besteht eine Differenz von etwa $+0,5$ km/sec. Eine Liste der Linien der A-Steine, die von W. E. HARPER zusammengestellt ist, findet sich in den Transactions 4, S. 188. Sie enthält die Wellenlangen derjenigen Steinlinien, die auf dem Victoria-Observatorium zur Bestimmung der Radialgeschwindigkeiten der A-Steine verwendet werden. Man vergleiche hierzu auch die Tafel von R. K. YOUNG, die sich in den Publ. Dom. Astrophys. Obs. Victoria 2, S. 7f (1921) befindet und als Grundlage für die Tabelle von HARPER gedient hat.

68 Systematische Unterschiede der auf verschiedenen Observatorien bestimmten Radialgeschwindigkeiten. Der „General Catalogue“ von J. H. MOORE. Als man die Radialgeschwindigkeiten verglich, die auf verschiedenen Observatorien erhalten worden waren, bemerkte man schon sehr bald, daß zwischen den Werten der einzelnen Observatorien nicht nur zufällige, sondern systematisch verlaufende Differenzen existierten, die nicht selten bis zu einigen Kilometern betrugen. Eine Ableitung des systematischen Unterschiedes war aber damals nicht möglich, da nur wenige Observatorien sich überhaupt mit der Bestimmung von Radialgeschwindigkeiten beschäftigten und daher nur für ganz wenige Sterne Werte von auch nur zwei Observatorien zur Verfügung standen. E. B. FROST¹ schlug daher 1902 vor, jedes Jahr eine Anzahl Sterne auf allen diesen Observatorien zu beobachten, diese Sterne gewissermaßen als Standardsterne anzusehen und sie zu benutzen, um das System der Radialgeschwindigkeiten des einen Observatoriums auf das System des anderen zu reduzieren. Dieser Vorschlag erhielt die Zustimmung von allen maßgebenden Persönlichkeiten (BELOPOLSKY, CAMPBELL, DESLANDRES, GILL, LORD, NEWALL, VOGEL), und in der Tat sind auch solche Beobachtungen angestellt und zum Teil veröffentlicht worden, beispielsweise von FROST und ADAMS², BELOPOLSKY³, SIMPHER⁴ usw. Zweifellos war dieser Plan sehr gut, aber er war, wie sich dann herausstellte, nicht weitgehend genug, denn LUDENDORFF⁵ zeigte 1914, daß die systematischen Fehler der Radialgeschwindigkeiten vom Spektraltypus abhängig sind, und das ist durch spätere, mit sehr gutem, großem Material durchgeführte Untersuchungen durch J. H. MOORE bestätigt worden⁶. Die ausführlichsten und zur Zeit besten Tabellen der systematischen Unterschiede der Radialgeschwindig-

	Oe5—B5		B8—A3	
	Δv	n	Δv	n
Lick - Victoria	+0,06 km	57	+0,95 km	33
Lick - Mt Wilson	+0,22	39	-0,10	75
Lick - Yerkes	-0,29	122	-0,95	238
Lick - Michigan	-0,5	8	+0,5	8
Lick - Ottawa	+0,2	7	+1,00	15
Lick - Ottawa (1920 bis 1922)	+9,3	28	+9,2	3
Lick - Allegheny	—	—	0,0	4
Lick - Wien	—	—	-1,5	11
Victoria - Mt Wilson	-0,12	53	-0,7	9
Victoria - Yerkes	-0,32	58	-2,00	43
Mt Wilson - Yerkes	-0,66	30	-0,96	76
Yerkes - Ottawa	—	—	+1,6	16
Mt Wilson - Ottawa	—	—	+1,5	10

¹ Ap J 16, S. 169 (1902)² Ap J 18, S. 237 (1903)³ Ap J 19, S. 85 (1904)⁴ Ap J 22, S. 318 (1905)⁵ A N 197, S. 1 (1914)⁶ Publ. Lick Obs. 16, S. XXXI (1928)

	A5—F4		F5—G4		G5—K4		K5—M	
	Δv	n	Δv	n	Δv	n	Δv	n
Lick — Victoria	+1,01 km	17	+1,30 km	26	+0,34 km	65	+1,00 km	21
Lick — Mt Wilson	-0,19	33	+0,33	69	-0,45	184	-0,76	84
Lick — Cape	+0,54	29	+0,92	60	-0,15	275	+0,08	91
Lick — Bonn	-0,8	1	-0,20	49	-1,64	140	-2,71	27
Lick — Yerkes	-0,04	37	+0,04	7	-0,23	10	-2,10	3
Lick — Ottawa	+3,6	1	-0,5	2	0,0	7	-3,2	1
Lick — Ottawa (1920 bis 1922)	+9,6	3	+11,6	1	—	—	—	—
Lick — Michigan	—	—	+3,4	4	+1,57	9	+1,0	4
Lick — Allegheny	+3,1	4	—	—	—	—	+4,8	1
Lick — Potsdam	0,0	1	+1,4	3	-1,0	7	—	—
Lick — Pulkowa	+0,6	2	+2,4	2	-0,1	9	—	—
Lick — Paris	+0,6	2	+2,2	2	-0,3	6	+1,2	2
Lick — Cambridge	—	—	0,0	2	+1,80	8	+5,7	1
Lick — Columbus	—	—	-2,16	7	-2,14	16	-1,0	1
Lick — Lowell	—	—	-0,2	2	-0,6	7	—	—
Lick — Wien	+2,6	3	+2,1	3	-9,0	2	-5,3	1
Victoria — Mt Wilson	-1,19	23	-0,69	63	-0,73	127	-1,80	34

keitsbeobachtungen verschiedener Observatorien sind in den Publikationen des Lick-Observatoriums¹ enthalten, und sie werden hier reproduziert

Mit Hilfe dieser Tabellen können die verschiedenen Beobachtungen von Radialgeschwindigkeiten auf ein einheitliches System reduziert werden, wie das nötig ist, wenn man die Geschwindigkeiten für stellarstatistische Untersuchungen oder für Bahnbestimmungen spektroskopischer Doppelsterne braucht. Es ist natürlich zu beachten, daß die in den Tabellen angegebenen Differenzen statistische Mittel sind, also für den einzelnen Stern nicht immer in aller Strenge gültig zu sein brauchen.

	A	F	G	K	M
Victoria	+1,0	+1,0	+1,0	+0,3	+1,0
Mt Wilson	0,0	0,0	+0,3	-0,5	-0,8
Cape	—	+0,5	+0,9	-0,2	0,0
Bonn	—	—	-0,2	-1,6	-2,7
Yerkes	-1,0	0,0	-0,5	-0,5	-0,5
Ottawa	+1,0	—	—	—	—
Ottawa (1920 bis 1922)	+9,4	+9,4	+9,4	+9,4	+9,4
Michigan	0,0	+1,8	+1,8	+1,8	+1,8
Cambridge	—	—	+1,8	+1,8	+1,8
Columbus	—	—	-2,0	-2,0	-2,0

J. H. MOORE² hat bei der Bearbeitung seines „General Catalogue of the Radial Velocities of Stars, Nebulae, and Clusters“ mit Hilfe dieser Tabellen systematische Korrekturen für die Werte der verschiedenen Observatorien abgeleitet und so das ganze Material vereinheitlicht. Vorstehende Tabelle enthält die von MOORE benutzten Korrekturen, in Kilometern ausgedrückt.

Da J. H. MOORE'S G. C. für lange Zeit der Fundamentalkatalog für Radialgeschwindigkeiten sein wird, sei hier noch nebenbei erwähnt, daß er 6980 Objekte umfaßt, sehr sorgfältig und zweckmäßig zusammengestellt ist und wohl das gesamte zur Zeit vorhandene Material enthält, so daß alle früheren Kataloge entbehrlich werden. Die 6980 Objekte verteilen sich folgendermaßen auf die verschiedenen Spektralklassen:

O Sterne	63
B „	1079
A „	1376
F „	548
G „	870
K „	1997
M „	727
N „	25
R „	36
S „	1
Pec „	17
Gasnebel	133
Kugelhafen	18
Extragalaktische Nebel	90
Summa	6980

¹ Publ Lick Obs 18, S. XI f. (1932)

² Publ Lick Obs 18 (1932)

Es wird immer nötig sein, daß ein jeder Beobachter seine Messungen auf das Vorhandensein systematischer Fehler, wie sie in den vorhergehenden Ziffern besprochen sind, selbst und möglichst scharf nach den dort angegebenen Verfahren prüft. Sehr beachtenswert sind die Ausführungen, welche in der Einleitung zum Bd 16 der Publ. Lick Obs auf S. XIff enthalten sind.

1 Es sind Spektrogramme von Sonne, Venus, Mars, Mond aufzunehmen und die aus ihnen sich ergebenden Radialgeschwindigkeiten mit den theoretisch bekannten zu vergleichen. Falls man sicher ist, daß instrumentelle Fehler nicht vorhanden sind, ist aus einer großen Anzahl derartiger Aufnahmen ein Wert für den systematischen Fehler des betreffenden Beobachters zu bestimmen und so an die Messungen anzubringen, daß er jederzeit wieder entfernt werden kann, wenn sich dies später einmal als wünschenswert herausstellt.

2 Es sind die Radialgeschwindigkeiten einer kleinen Anzahl von Sternen aller Spektralklassen (mit Ausnahme von G0) zu bestimmen. Diese Sterne sollen hell sein, gut meßbare Linien haben und eine konstante Radialgeschwindigkeit besitzen. Von jedem Stern ist unter günstigsten Beobachtungsbedingungen eine größere Anzahl von Aufnahmen zu machen. Diese Sterne sind demnach als Standardsterne nach dem Plane von Frost anzusehen (s. die nächste Ziffer).

3 Sollen neben Spektrographen großer Dispersion auch solche mit geringer benutzt werden, so ist mit letzteren eine Anzahl derselben Standardsterne wie unter 2 aufzunehmen und zu prüfen, ob zwischen beiden Instrumenten systematische Fehler in den Beträgen der Radialgeschwindigkeiten vorhanden sind, und zwar sind in beiden Spektren einmal dieselben Sternlinien zu messen und dann diejenigen, welche sich zur Messung bei kleiner Dispersion besonders eignen. Wahrscheinlich ist nämlich vielfach ein systematischer Unterschied in den Radialgeschwindigkeiten vorhanden, der von der Auswahl der Linien abhängt.

Die Bestimmung der systematischen Fehler eines Radialgeschwindigkeitskataloges kann übrigens zur Zeit nur als eine provisorische Arbeit angesehen werden, die es ermöglicht, Beobachtungen verschiedener Observatorien aufeinander zu reduzieren. Die wahren systematischen Fehler der Radialgeschwindigkeiten und damit diese selbst werden erst dann einmal gefunden werden können, wenn man genauer weiß, wie sich die Spektrallinien der verschiedenen Elemente, besonders die verschiedenen Linienserien in den Atmosphären der Sterne verhalten und wenn bisher noch ungeklärte Erscheinungen und Effekte (z. B. der K-Effekt) ihre Deutung gefunden haben.

69 Verzeichnis von Fundamentalsternen für die Radialgeschwindigkeitsbestimmung. Die Internationale Astronomische Union (I. A. U.) hat das Bedürfnis eines Verzeichnisses von Fundamentalsternen für Radialgeschwindigkeitsmessungen anerkannt. In ihren Transactions 3, S. 171, ist eine Liste heller Sterne der verschiedenen Spektraltypen gegeben, sie sei hier abgedruckt.

Stern	lR	Dekl	m	Spektrum	R _G
α Cassiopeiae	0 ^h 34 ^m 8	+55° 59'	2,47	K0	— 3,4 km
β Ceti	0 38 ,6	—18 32	2,24	K0	+13,1
α Arietis	2 1 ,5	+22 59	2,23	K2	—14,1
α Ceti	2 57 ,1	+ 3 42	2,82	Ma	—25,4
α Persei	3 17 ,2	+49 30	1,90	F5	— 2,5
α Tauri	4 30 ,3	+16 18	1,06	K5	+54,4
β Leporis	5 24 ,0	—20 50	2,96	G0	—13,7
α Leporis	5 28 ,3	—17 54	2,69	F0	+24,4
α Carinae	6 21 ,7	—52 38	—0,86	F0	+20,2
β Geminorum	7 39 ,2	+28 16	1,21	K0	+ 3,6
α Hydrae	9 22 ,7	— 8 14	2,16	K2	— 4,2
ε Leonis	9 40 ,2	+24 14	3,12	G0p	+ 5,0

Stern	AR	Dekl	m	Spektrum	RG
η Leonis	10 ^h 1 ^m ,9	+17° 15'	3,58	A0p	+ 2,4 km
β Virginis	11 45 ,5	+ 2 20	3,80	F8	+ 4,7
γ Crucis	12 25 ,6	-56 33	1,61	Mb	+21,3
β Corvi	12 29 ,1	-22 51	2,84	G5	- 7,5
α Bootis	14 11 ,1	+19 42	0,24	K0	- 5,1
δ Ophiuchi	16 9 ,1	- 3 26	3,03	Ma	-19,3
α Triang austr	16 38 ,1	-68 51	1,88	K2	- 3,6
α Herculis	17 10 ,1	+14 30	3,48	Mb	-32,0
δ Sagittarii	18 14 ,6	-29 52	2,84	K0	-19,9
α Lyrae	18 33 ,6	+38 41	0,14	A0	-13,2
γ Aquilae	19 41 ,5	+10 22	2,80	K2	- 1,9
β Aquarii	21 26 ,3	- 6 1	3,07	G0	+ 6,1
ϵ Pegasi	21 39 ,3	+ 9 25	2,54	K0	+ 5,4
ι Piscium	23 34 ,8	+ 5 5	4,28	F8	+ 4,8

Es hat sich aber als notwendig erwiesen, auch für schwache Sterne eine solche Liste aufzustellen (Transactions 4, S 181), die in folgender Tabelle wiedergegeben ist

Stern	AR	Dekl	m	Spektrum	RG
Lal 1045	0 ^h 37 ^m	+39° 47'	7,5	K5	- 62 km
Lal 1966	1 5	+61 9	7,9	F3s	-325
Groom 864	4 36	+41 59	7,3	G1	+105
Lal 15565	7 56	+29 27	6,9	G7	+ 14
Lal 21185	10 59	+36 28	7,6	M2	- 87
Groom 1830	11 49	+38 15	6,5	G8	- 98
Cunn 1695	13 9	+17 55	7,8	F9s	+ 49
Groom 2305	16 2	+39 21	6,8	G8	- 60
Groom 2875	19 30	+58 26	6,7	K5	+ 12
Lal 43876	22 25	+16 53	7,5	G9	- 40
Fed 4371	23 2	+68 0	7,5	G2	- 21

Als Ergänzung ist noch eine Liste von O- und B-Sternen nach Beobachtungen von PLASKETT und PEARCE angefügt (Transactions 4, S 181)

O- und B-Sterne

Stern	AR	Dekl	m	Spektrum	RG
H D 886	0 ^h 8 ^m ,1	+14° 38'	2,87	B2ss	+ 5,0 km
H D 3360	0 31 ,4	+53 21	3,72	B2sk	+ 2,1
H D 34078	5 9 ,7	+34 12	5,81	O9ssk	+59,3
H D 36591	5 27 ,7	- 1 40	5,30	B2sk	+34,3
H D 37128	5 31 ,1	- 1 16	1,75	B0k	+25,8
H D 160762	17 36 ,6	+46 4	3,79	B3s	-18,0
H D 166182	18 4 ,4	+20 48	4,43	B2sk	-13,0

m. Reduktion der Radialgeschwindigkeiten auf die Sonne.

70 Einleitung Die Radialgeschwindigkeit, die unmittelbar aus der Messung eines Sternspektrums erhalten wird, stellt die Radialgeschwindigkeit des Sterns gegen den Beobachter dar, sie ist also das Resultat der Bewegung des Sterns und des Beobachters, der selbst in Bewegung begriffen ist, da er ja an der Bewegung der Erde (Revolution und Rotation) teilnimmt. Es muß die aus dem Spektrogramm folgende Radialgeschwindigkeit veränderlich sein, selbst wenn ein Stern mit konstanter Geschwindigkeit beobachtet wurde, und zwar um den Betrag, um welchen sich die Radialgeschwindigkeit des Beobachters ändert. Man hat daher von Anfang an die Radialgeschwindigkeiten der Sterne nicht

auf den Ort des Beobachters, sondern auf die Sonne bezogen¹ Um diese Reduktion der Radialgeschwindigkeit auf die Sonne vorzunehmen, ist die Radialgeschwindigkeit des Beobachters aus den bekannten Elementen der Erdbahn und der Erdrotation zu berechnen

71 Jährliche Bewegung der Erde Die Berechnung der Radialgeschwindigkeit der Erde infolge ihrer Bahnbewegung um die Sonne kann auf zweierlei Weise ausgeführt werden, je nachdem man von den elliptischen Bahnelementen der Erde ausgeht, also die Störungen der Erdbewegung durch Mond und Planeten vernachlässigt, oder aber die in den Ephemeriden gegebenen rechtwinkligen Koordinaten X, Y, Z der Sonne benutzt und so die Störungen berücksichtigt Es seien

λ, β die mittlere Länge und Breite des beobachteten Sternes, } mittl Aquino-
 \bigcirc die mittlere Länge der Sonne zur Zeit der Beobachtung, } noktum des
 Π die Länge der Sonne im Perigäum ($\Pi = 281^\circ$), } Jahresanfanges
 A der Äquatorhalbmesser der Erde, in km ausgedrückt, nach BESSEL

6377,397 km [3,80464],

a die Halbachse der Erdbahn, $a = \frac{A}{p \sin 1''} = 149480000$ km [8,17458],

p die Sonnenparallaxe ($8'',80$),

e (bzw $\sin \varphi$) die Erdbahnezentrizität (0,01675),

T die Länge des siderischen Jahres, ausgedrückt in Sekunden mittlerer Zeit, 31558150 [7,49911],

$90^\circ - \iota$ der Winkel zwischen der Richtung, nach der die Erde sich bewegt, und dem Radiusvektor der Erdbahn,

v die mittlere Geschwindigkeit der Erde, ausgedrückt in km, $v = \frac{a}{\sqrt{1-e^2}} \frac{2\pi}{T}$
 $= 29,765$ km [1,47371],

v_1 die Radialgeschwindigkeit der Erde zur Zeit der Beobachtung,

x_B die gesuchte Reduktion auf die Sonne, d h die Projektion von v_1 auf die Gesichtslinie

Dann ist²

$$\operatorname{tg} \epsilon = \frac{e \sin(\bigcirc - \Pi)}{1 + e \cos(\bigcirc - \Pi)}, \quad (1) \quad v_1 = \frac{a}{\sqrt{1-e^2}} \frac{2\pi}{T} [1 + e \cos(\bigcirc - \Pi)] \sec \iota, \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} x_B &= - \frac{a}{\sqrt{1-e^2}} \frac{2\pi}{T} [1 + e \cos(\bigcirc - \Pi)] \sin(\lambda - \bigcirc + \iota) \cos \beta \sec \iota \\ &= v \cos \beta \sin(\bigcirc - \lambda) + v e \cos \beta \sin(\Pi - \lambda) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Setzt man noch

$$\left. \begin{aligned} b &= v \cos \beta, & c &= v e \cos \beta \sin(\Pi - \lambda), \\ \text{so ist} & & x_B &= b \sin(\bigcirc - \lambda) + c \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Da weder b noch c die Sonnenlänge \bigcirc enthalten, sind sie für lange Zeiten für einen jeden Stern als Konstanten zu betrachten Es ändert sich nämlich β nicht mehr als um $49''$ im Jahrhundert, $\Pi - \lambda$ um $20'$ Es können daher für jeden Stern b und c für ein Jahrhundert tabuliert werden, ohne daß ein Fehler in x_B im Betrag von 0,01 km pro sec entsteht Solche Tafeln sind z B von F SCHLESINGER für die helleren Sterne der Nordhalbkugel berechnet worden³ Eine

¹ H C VOGEL, Potsdam Publ 7, S 92 (1892), W W CAMPBELL, Astronomy and Astrophysics 11, S 319 (1892), Stellar Motions, S 64 1913, SCHEINER-FROST, Treatise on Astronomical Spectroscopy, S 338 1894, F SCHLESINGER, Ap J 10, S 1 (1899), FR W KÜSTNER, A N 169, S 254 (1905)

² Eine Ableitung dieser Formeln findet sich in CHAUVENET, Manual of Spherical and Practical Astronomy 1, S 635

³ Ap J 10, S 1 (1899)

Tafel für die z und v_1 hat CAMPBELL¹ gegeben mit der Sonnenlänge \odot als Argument, dessen Wert für die Zeit der Beobachtung aus den Ephemeriden zu entnehmen ist

Soll die Berechnung ekliptikaler Koordinaten des Sternes vermieden werden, so ist folgender Weg einzuschlagen² Es seien

α, δ die Äquatorealkoordinaten eines Sterns,

A, D die Äquatorealkoordinaten des Punktes der Ekliptik, nach welchem sich die Erde mit einer Geschwindigkeit v_1 zur Zeit der Beobachtung bewegt (Zielpunkt oder Apex der Erdbewegung),

dann ist die Reduktion auf die Sonne $v_1 \cos \psi$, wenn ψ der Winkel zwischen den Richtungen nach dem Stern und dem Zielpunkt der Erdbewegung bedeutet oder

$$x_E = v_1 [\sin D \sin \delta + \cos D \cos(\alpha - A) \cos \delta] \quad (5)$$

Ist ε die Schiefe der Ekliptik, so berechnet sich A aus

$$\operatorname{tg} A = \cos \varepsilon \cotg(\odot - z) \quad (6)$$

v_1 und z können den obenerwähnten Tafeln von CAMPBELL entnommen werden Der Wert von D folgt aus

$$\operatorname{tg} D = \sin A \operatorname{tg} \varepsilon \quad (7)$$

Man berechnet also zunächst A und D mittels (6) und (7) und erhält dann die Reduktion x_E auf die Sonne aus (5)

Zur näherungsweisen Berechnung der Reduktion auf die Sonne haben H K PALMER³ und J HARTMANN⁴ Vorschriften angegeben, graphische Verfahren F HENROTEAU⁵ und G VAN BIESBROECK²

Eine zweite Art der Berechnung läßt sich, wie oben erwähnt, mit Hilfe der in den Ephemeriden von 12 zu 12 Stunden gegebenen äquatorealen rechtwinkligen Koordinaten der Sonne durchführen⁶ Es seien dX, dY, dZ die äquatorealen Komponenten der Erdbeschwindigkeit, bezogen auf den Sonnenmittelpunkt, und zwar dX die Komponente der Erdbewegung in der Richtung parallel zur Linie der Äquinoktien, dY die Komponente senkrecht zu dX und parallel zur Ebene des Äquators, dZ die Komponente senkrecht zur Ebene des Äquators

In den Ephemeriden sind die Werte der äquatorealen rechtwinkligen Koordinaten der Sonne von 12 zu 12 Stunden gegeben, im Berliner Jahrbuch von 1896 an die Differenzen $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ dieser Koordinaten für die Stunden 6^h und 18^h Berliner mittlerer Sonnenzeit eines jeden Tages Es ist klar, daß diese Differenzen als die Geschwindigkeitskomponenten im oben definierten Sinne betrachtet werden können, die Zeiteinheit sind 12 Stunden, die Längeneinheit ist der mittlere Radiusvektor der Erdbahn (Eine Reduktion dieser Differenzen $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ auf die Differentialquotienten dX, dY, dZ ist bei dem 12stündigen Intervall nämlich stets Null) Die Korrektur x_E ergibt sich dann, wenn α, δ die Rektaszension und die Deklination des Sternes für dasselbe mittlere Äquinoktium sind, zu

$$x_E = -[\Delta X \cos \delta \cos \alpha + \Delta Y \cos \delta \sin \alpha + \Delta Z \sin \delta] K, \quad (8)$$

die zu den beobachteten Radialgeschwindigkeiten hinzuzufügen ist Der Faktor K stellt den Übergang auf Kilometer und Zeitsekunden dar

$$K = \frac{a}{43200}, \quad \log K = [3,53910]$$

(Sind die Differenzen $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ in Einheiten der 7 Dezimale angegeben, so ist $\log K = [6,53910 - 10]$) Zur Berechnung von K ist $p = 8'',80$ und der

¹ Stellar Motions, S 68

² G VAN BIESBROECK, Ap J 64, S 258 (1926)

³ Lick Bull 4, S 70 (1906)

⁴ A N 173, S 97 (1906)

⁵ Pop Astr 33, S 248 (1925)

⁶ F SCHLESINGER, Ap J 9, S 159 (1899), FR W KUSTNER, A N 169, S 256 (1905)

Aquatorealhalbmesser der Erde nach BESSEL benutzt Das negative Vorzeichen in (8) ist infolge des Überganges von der Sonnen- auf die Erdkoordinaten hinzugekommen Zur Erleichterung der Interpolation von $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ hat SCHLESINGER eine Hilfstafel gegeben¹ Wie schon erwähnt, sind bei dieser Art der Berechnung die Störungen, die die Erde durch den Mond und die Planeten erleidet, berücksichtigt

72 Monatliche Bewegung der Erde Die Korrektion wegen der monatlichen Geschwindigkeit der Erde (Bewegung des Schwerpunktes Erde–Mond), ist stets gering, infolgedessen können bei Berechnung derselben die geringe Neigung gegen die Ekliptik und die Exzentrizität der Mondbahn unberücksichtigt bleiben Die Korrektion ergibt sich zu

$$x_{\zeta} = -v_{\zeta} \cos \beta \sin (\zeta - \lambda), \quad (9)$$

wo v_{ζ} die Geschwindigkeit in km pro sek ist, welche die Erde durch ihre Bewegung um den Schwerpunkt Erde–Mond besitzt, und ζ die Länge des Mondes zur Zeit der Beobachtung

Die Konstante v_{ζ} berechnet sich folgendermaßen Die Masse des Mondes ist $\frac{1}{81,70}$, die mittlere Entfernung des Mondes ist 60,27 A , die Länge des siderischen Monats in Sterntagen ist 27,3965 Daraus folgt

$$v_{\zeta} = \frac{60,27}{81,70} \frac{v_d}{27,3965} = 0,0124 \text{ km [8,0924]} \quad (10)$$

v_d ist die Konstante der taglichen Geschwindigkeit $v_d = \frac{2\pi A}{86164,1}$ (86164,1 ist die Länge des Sterntages in mittleren Sekunden) Die Korrektion x_{ζ} ist nur an Messungen sehr hoher Genauigkeit anzubringen, da ihr maximaler Wert $\pm 0,0124$ km/sec beträgt

73 Tagliche Bewegung der Erde. Die Korrektion wegen der taglichen Bewegung der Erde ist

$$x_d = -v_d \varrho \cos \varphi' \sin t \cos \delta, \quad (11)$$

wenn ϱ und φ' der Radiusvektor und die geozentrische Breite des Beobachtungs-ortes, t und δ Stundenwinkel und Deklination des Sterns sind Für

$$v_d = \frac{2\pi A}{86164,1} \quad \text{ergibt sich} \quad v_d = 0,465 \text{ km [9,6675]}. \quad (12)$$

Die Korrektion x_d ist negativ, wenn der Stern westlich vom Meridian, positiv, wenn er östlich vom Meridian beobachtet wurde Sie läßt sich für ein jedes Observatorium tabulieren mit dem Stundenwinkel t als Argument und der Deklination δ als zweitem Argument W W CAMPBELL² gab eine solche Tafel für das Lick-Observatorium, und sie kann leicht durch Multiplikation mit $\cos \varphi$ für die Breite φ umgerechnet werden

74 Bewegung der Erde durch planetare Störungen Die planetaren Störungen der Erdgeschwindigkeit werden, wie bereits oben erwähnt, streng berücksichtigt, wenn man die Korrektion für die jährliche Geschwindigkeit der Erde mit Hilfe der Differenzen $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ berechnet Der Betrag ist stets sehr klein und dürfte kaum 0,01 km erreichen

75 Reduktion der Radialgeschwindigkeit auf den Schwerpunkt des Sonnensystems³ Bisher ist die Bewegung der Erde in bezug auf den Mittelpunkt der Sonne betrachtet worden KUSTNER hat nun darauf aufmerksam gemacht, daß in Strenge die Beobachtungen auf den Schwerpunkt des Sonnensystems zu reduzieren sind, und er hat gezeigt, daß bei Reduktion von Beobachtungen

¹ Ap J 9, S 160 (1899)

² Stellar Motions, S 69

³ A N 169, S 257 (1905)

sehr großer Genauigkeit, wie z B bei der Bestimmung der Sonnenparallaxe, die Radialgeschwindigkeiten auf den Schwerpunkt des Sonnensystems bezogen werden müssen. In Betracht kommen nur Jupiter und Saturn, da der Einfluß dieser Planeten auf die Lage des Schwerpunktes des Sonnensystems an sich gering ist, können die Einwirkungen der einzelnen Planeten getrennt behandelt und außerdem die kleinen Neigungen und Exzentrizitäten der Planetenbahnen vernachlässigt werden. Die linearen Geschwindigkeiten der Planeten sind dann umgekehrt proportional den Quadratwurzeln aus den großen Halbachsen (a_p), und es ist ferner, um die entsprechende Geschwindigkeit der Sonne zu erhalten, der Divisor $M + 1$ hinzuzufügen, wenn M die Sonnenmasse in Einheiten der Masse der Planeten ist. Es wird somit die an die beobachtete Radialgeschwindigkeit anzubringende Korrektur

$$x_p = \frac{v}{(M + 1)\sqrt{a_p}} \cos \beta \sin(l - \lambda), \quad (13)$$

wenn l die heliozentrische Länge des Planeten ist. KUSTNER berechnet für

$$M_{\overline{p}} = 3501,6$$

und

$$M_{21} = 1047,4,$$

die Korrekturen

$$x_{\overline{p}} = 0,0027 \text{ km}$$

$$x_{21} = 0,0124 \text{ „ ,}$$

so daß die vereinte Wirkung dieser beiden Planeten im Maximum auf 0,015 km anwachsen kann, ein Betrag, der bei genauen Messungen in der Tat nicht vernachlässigt werden darf.

76 Berechnung der Radialgeschwindigkeit eines Planeten gegen die Erde.

Ein sehr geeignetes Mittel, die Spektrographen in bezug auf die Genauigkeit der mit ihnen erhaltenen Radialgeschwindigkeiten zu prüfen, ist die Bestimmung der Radialgeschwindigkeit eines Planeten. Der aus den Messungen erhaltene Wert muß mit dem aus den astronomischen Tafeln berechneten übereinstimmen. Für diese Berechnung ist folgendes zu beachten¹. Das Licht eines Planeten ist kein Eigenlicht, sondern reflektiertes Sonnenlicht. Ist nun die Planetenbahn nicht rein kreisförmig, so erleidet das Planetenlicht bereits einen DOPPLER-Effekt, da der Planet während seines Umlaufes um die Sonne sich dieser bald nähert, bald wieder entfernt. Wird er von der Erde aus spektroskopisch beobachtet, so kommt der DOPPLER-Effekt noch hinzu, der durch die Distanzänderung zwischen Erde und Planet entsteht. Man hat also einmal die Radialgeschwindigkeit des Planeten gegen die Sonne und dann die des Planeten gegen die Erde zu berechnen. Die Summe dieser beiden DOPPLER-Effekte gibt dann die Radialgeschwindigkeit des Planeten gegen die Erde.

Die Berechnung gestaltet sich nun nach CAMPBELL² folgendermaßen. Aus einer der Ephemeriden wird $\log D = f$ entnommen, wo D die Distanz der Mittelpunkte von Sonne und Planet bzw. Erde und Planet bedeutet. Die Radialgeschwindigkeit pro km und sek des Planeten gegen die Sonne bzw. der Erde gegen den Planeten ist dann

$$\frac{dD}{dt} = \frac{149\,500\,000}{\omega m} D,$$

wo ω die Zeitinheit der Ephemeride und m der Modulus der BRIGGSschen Logarithmen ist ($\log m = 9,63778 - 10$)

¹ C NIVEN, M N 34, S 345 (1874), H POINCARÉ, C R 120, S 420 (1895)

² Ap J 8, S 151 (1898), Stellar Motions S 59

Es handelt sich nun darum, D aus den Ephemeriden zu interpolieren. T sei das Datum in der Ephemeride, welches der Zeit t der Beobachtung am nächsten liegt. Für die Interpolation ergibt sich dann folgendes, in der üblichen Weise geschriebenes Schema

		I Differenz	II Differenz	III Differenz	
$T - 2\omega$	$f(T - 2\omega)$	a_{11}	b'		
$T - \omega$	$f(T - \omega)$	a_1		c_1	
T	$f(T)$	a	b	c	d
$T + \omega$	$f(T + \omega)$	a'	b_1	c'	
$T + 2\omega$	$f(T + 2\omega)$	a''			

worin $a = \frac{1}{2}(a_1 + a')$, $c = \frac{1}{2}(c_1 + c')$ ist

Es sei der Zeitmoment, für den die Radialgeschwindigkeit berechnet werden soll, $T + t$ und $n = \frac{t}{\omega}$, dann folgt

$$\log D = f(T + t) = f(T) + \left(a - \frac{c}{6}\right)n + \left(\frac{b}{2} - \frac{d}{24}\right)n^2 + \frac{c}{6}n^3 + \frac{d}{24}n^4 + \left. \begin{array}{l} \text{und somit} \\ \frac{dD}{dt} = V_p = \frac{149\,500\,000}{m\omega} D \left[a - \frac{c}{6} + \left(b - \frac{d}{12}\right)n + \frac{c}{2}n^2 + \frac{d}{6}n^3 + \right] \end{array} \right\} (14)$$

Ist ω ein mittlerer Sonnentag = 86400 sek, so ergibt sich der Logarithmus des Zahlenfaktors zu [3,6003]. An der erwähnten Stelle¹ gibt CAMPBELL als Beispiel die Berechnung der Radialgeschwindigkeit der Venus gegen die Erde.

77. Berechnung der Radialgeschwindigkeit des Mondes gegen die Erde.

Wenn kein Planet in geeigneter Stellung am Himmel ist, wird häufig ein Vergleich der beobachteten Radialgeschwindigkeit des Mondes gegen die Erde zur Prüfung des Spektrographen verwendet, indem sie mit der aus den Mondtafeln berechneten verglichen wird. Auch diese Aufgabe ist von CAMPBELL behandelt² worden. Ganz analog wie bei der Berechnung der Radialgeschwindigkeit eines Planeten gegen die Erde ist auch hier zu beachten, daß der Mond kein selbstleuchtender Körper ist. Aber beim Mond gestalten sich die Verhältnisse sehr viel komplizierter. Es setzt sich die Radialgeschwindigkeit des Mondes gegen den Beobachter auf der Erde aus folgenden Teilen zusammen:

V_1 = Radialgeschwindigkeit des Erdmittelpunktes gegen die Sonne,

V_2 = Radialgeschwindigkeit des Mondes gegen den Erdmittelpunkt,

V_3 = die Komponente der Radialgeschwindigkeit V_2 in Richtung der Verbindungslinie Sonne—Mond,

V_4 = die Komponente der Bahngeschwindigkeit des Mondes (bezogen auf den Erdmittelpunkt) in dem größten Kreis, der durch die Sonne und den Mond geht

Die Radialgeschwindigkeit infolge der Dichtung des Mondes um seine Achse ist zu vernachlässigen, da sie 0,005 km nicht übersteigt, die Radialgeschwindigkeit V_5 infolge der Drehung der Erde um ihre Achse wird nach den oben gegebenen Vorschriften berechnet.

Die gesuchte Radialgeschwindigkeit V des Mondes gegen den Beobachter auf der Erde ergibt sich somit zu

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 - V_5 \quad (15)$$

¹ Ap J 8 S 151 (1898), Stellar Motions S 59

² Ap J 11, S 141 (1900)

Es sind nun die einzelnen Komponenten von V zu berechnen

a) Ist $\log D_1$ der Logarithmus des Radiusvektors der Erde und a die stündliche Änderung von $\log D_1$, m der Modul der BRIGGSschen Logarithmen, $\omega_1 = 3600$ die Zahl der Sekunden in einer Stunde, so ist

$$V_1 = \frac{149\,500\,000}{\omega_1 m} D_1 a = [4,9805] D_1 a \quad (16)$$

D_1 und a sind z B im Nautical Almanac tabuliert

b) Es sei

R der Aquatorealhalbmesser der Erde in Kilometern,

D_2 die Distanz des Mondes vom Erdmittelpunkt,

p die Horizontalparallaxe des Mondes,

Δp die Änderung dieser Parallaxe in 12 Stunden, so ist

$$D_2 = \frac{R}{\sin p} = \frac{[3,8047]}{\sin p},$$

$$V_2 = \frac{dD_2}{dt} = \frac{-R \sin 1''}{3600} \frac{\cos p}{\sin^2 p} \Delta p = -[4,9340] \frac{\cos p}{\sin^2 p} \Delta p \quad (17)$$

p und Δp sind ebenfalls im Nautical Almanac tabuliert

c) Ist E die Winkeldistanz zwischen Sonne und Mond, so ist

$$V_3 = -V_2 \cos E \quad (18)$$

Die „Monddistanz“ E ist gleichfalls im Nautical Almanac enthalten mit Ausnahme der Zeiten um den Vollmond herum Für diese Zeiten berechnet sich E und dE/dt nach folgenden Formeln¹

$$\cos E = \sin \delta \sin \mathcal{D} + \cos \delta \cos \mathcal{D} \cos(A - \alpha),$$

$$\sin E \frac{dE}{dt} = \sin \delta \cos \mathcal{D} \left[\cos(A - \alpha) \frac{d\delta}{dt} - \frac{d\mathcal{D}}{dt} \right] + \cos \delta \sin \mathcal{D} \left[\cos(A - \alpha) \frac{d\mathcal{D}}{dt} - \frac{d\delta}{dt} \right] + \cos \delta \cos \mathcal{D} \sin(A - \alpha) \frac{d(A - \alpha)}{dt},$$

wenn

A die Rektaszension der Sonne,

α die Rektaszension des Mondes,

\mathcal{D} die Deklination der Sonne,

δ die Deklination des Mondes ist

d) Ist ΔE die Änderung von E in einer Sekunde (positiv oder negativ, je nachdem die Distanz wächst oder abnimmt), so ist

$$V_4 = \sin 1'' D_2 \sin E \Delta E = [4,6856] D_2 \sin E \Delta E, \quad (19)$$

$$D_2 = \frac{R}{\sin p} = \frac{[3,8047]}{\sin p}$$

Die Monddistanz und das arithmetische Komplement von $\log(\Delta E)$ sind aus dem Nautical Almanac zu entnehmen

Ein Beispiel für diese Rechnung ist von CAMPBELL in der oben zitierten Abhandlung gegeben worden

78 Spektrographische Bestimmung der Aberrationskonstante bzw der Sonnenparallaxe^{2,3,4} Der Gedanke, aus Messungen der Radialgeschwindigkeit geeignet ausgewählter Sterne die Sonnenparallaxe zu bestimmen, liegt sehr nahe, und er ist fast so alt, wie die Messung von Radialgeschwindigkeiten über-

¹ R. H. CURTISS, Lick Bull 3, S 112 (1905) Ein Beispiel ist auch hier durchgerechnet

² A N 169, S 241 (1905) ³ Obs 31, S 239 (1908)

⁴ Ann Cape Obs 10, Pt 3 (1909)

haupt Diese Messungen mußten aber erst weitgehend vervollkommen werden, ehe eine solche Bestimmung Wert haben konnte. Der erste, der den Versuch tatsächlich durchführte, war F KUSTNER¹, er konnte zeigen, daß sorgfältige Messungen eine so hohe Genauigkeit besitzen, daß die spektrographische Messung der Sonnenparallaxe den anderen Methoden der Parallaxenbestimmung nicht nachsteht, diese aber an Arbeitsökonomie übertrifft.

Im Prinzip ist das ganze Verfahren höchst einfach. Durch die Ausmessung eines Sternspektrogramms wird die Verschiebung $\Delta\lambda$ gefunden, welche eine Spektrallinie der Wellenlänge λ durch die Bewegung des Sterns erfährt. Diese Verschiebung $\Delta\lambda$ ergibt durch Multiplikation mit U/λ (U = Lichtgeschwindigkeit in km) nach dem DOPPLERSchen Prinzip die Radialgeschwindigkeit V des Sterns gegen die Erde.

V setzt sich aus zwei Teilen zusammen: der Radialgeschwindigkeit v_s des Sternes gegen die Sonne und der Komponente v_E der Erdbewegung in Richtung des Sternes für den Zeitpunkt der Beobachtung.

$$V = v_s + v_E$$

Nun ist $v_E = v \cos\beta [\sin(\odot - l) + e \sin(\Pi - l)]$, wo die Konstante der Erdbewegung $v = \frac{2\pi a \sec\varphi}{T} = \frac{2\pi A \sec\varphi}{p \sin 1'' T}$, l, β die Länge und Breite des Sterns, \odot die Länge der Sonne, Π die Perihellänge der Sonne, $e = \sin\varphi$ die Exzentrizität der Erdbahn, p die Sonnenparallaxe in Bogensekunden, a der Erdbahnhalm, A der Äquatordurchmesser der Erde (in km), T die Länge des siderischen Jahres, ausgedrückt in Sekunden mittlerer Zeit, sind.

Zwischen V und der auf dem Spektrogramm gemessenen Verschiebung $\Delta\lambda$ besteht somit die Beziehung

$$\begin{aligned} \text{oder} \quad V &= \frac{\Delta\lambda}{\lambda} U = v_s + v \cos\beta [\sin(\odot - l) + e \sin(\Pi - l)] \\ \frac{\Delta\lambda}{\lambda} &= \frac{v_s}{U} + \frac{v}{U} \cos\beta [\sin(\odot - l) + e \sin(\Pi - l)] \\ &= \frac{v_s}{U} + k \sin 1'' \cos\beta [\sin(\odot - l) + e \sin(\Pi - l)], \end{aligned}$$

da $k = \frac{v}{U \sin 1''}$ die Aberrationskonstante in Bogensekunden ist.

Als primäres Resultat folgt somit aus der Ausmessung von Sternspektrogrammen die Aberrationskonstante k und nicht die Sonnenparallaxe p , zu deren Berechnung eine Kenntnis der Konstanten A und U nötig ist. Die Genauigkeit, mit der p erhalten wird, hängt außer von der Genauigkeit der Messungen noch von der Genauigkeit der Werte von A und U ab, und der Wert der Sonnenparallaxe ist erst als ein sekundäres Resultat der Vermessung von Sternspektrogrammen anzusehen. Auf diese Verhältnisse hat H. C. PLUMMER² hingewiesen, nachdem KUSTNER¹ seine bekannte spektrographische Messung der Sonnenparallaxe veröffentlicht hatte.

KUSTNER verfuhr folgendermaßen. Für die Radialgeschwindigkeit v_s des beobachteten Sternes wurde ein angenäherter Wert v_s^0 zugrunde gelegt, zu dem eine Korrektur x hinzukommt, so daß $v_s^0 + x$ der wahrscheinlichste Wert der Radialgeschwindigkeit des Sternes ist. In gleicher Weise wird ein angenäherter Wert v^0 der Konstante der Erdbeschwindigkeit durch eine Korrektur y verbessert, so daß

$$V = v_s^0 + x + (v^0 + y) \cos\beta [\sin(\odot - l) + e \sin(\Pi - l)]$$

¹ A N 169, S 241 (1905)

² Obs 31, S 239 (1908)

ist oder

$$\begin{aligned} n &= V - v_s^0 - v^0 \cos \beta [\sin(\odot - l) + e \sin(II - l)] \\ &= v + y \cos \beta [\sin(\odot - l) + e \sin(II - l)] = v + y \frac{v_s^0}{v^0} \end{aligned}$$

Eine jede Platte gibt somit eine lineare Gleichung $n = x + by$, die Gesamtheit dieser Gleichungen wird dann nach der Methode der kleinsten Quadrate aufgelöst, die x und y werden an die Ausgangswerte v_s^0 und v^0 angebracht. Es folgt dann aus

$$\frac{vT}{2\pi \sec \varphi} = a \quad \text{die Sonnenparallaxe} \quad p = \frac{A}{a \sin 1''}$$

Die Korrekturen für die tagliche und monatliche Bewegung der Erde und die Reduktion auf den Schwerpunkt des Sonnensystems sind natürlich vorher an die gemessene Radialgeschwindigkeit anzubringen. Besitzt der beobachtete Stern eine veränderliche Radialgeschwindigkeit (z. B. α Scorpi), so ist auch dies zu berücksichtigen.

Die zu beobachtenden Sterne sollen nicht zu weit von der Ekliptik abstehen, die günstigsten Beobachtungszeiten für die Bestimmung der Aberrationskonstante bzw. der Sonnenparallaxe sind diejenigen, in welchen der Winkel Stern—Sonne—Erde nahe 90° ist (d. h. die Zeit der beiden Quadraturen). Es mag noch erwähnt werden, daß für diese Art von Spektralmessungen sich der HARMANNsche Spektrokomparator ganz besonders gut eignet, da die Linienidentifizierung für diese Aufgabe keine Rolle spielt, sondern nur Änderungen der Radialgeschwindigkeit und nicht diese selbst in Betracht kommen.

Eine auf größerem Beobachtungsmaterial beruhende Bestimmung der beiden Konstanten ist auf dem Cape Observatory ausgeführt worden [Ann. Cape Obs. 10, Pt. 3 (1909)], eine weitere auf der Bonner Sternwarte (Veröffentl. Nr. 25, 1930).

79 Bestimmung der Rotation eines Planeten durch spektrographische Beobachtungen. Wie in Bd. IV des Handb. S. 158ff. auseinandergesetzt wurde, lassen sich aus spektroskopischen Beobachtungen die Rotationsglieder der Sonne mit großer Genauigkeit bestimmen¹. Das legte den Gedanken nahe, unter Benutzung eines Fernrohrs großer Brennweite dieses Verfahren auch auf die großen Planeten anzuwenden, und in der Tat haben derartige Messungen sehr gute Resultate ergeben.

Wird der Spalt des Spektrographen so durch das in der Brennebene des Fernrohrs entstehende Bild des Planeten gelegt, daß die Spalttrichtung mit der Projektion der Rotationsachse zusammenfällt, so weisen die Linien im Planetenspektrum keinerlei Lagenänderung gegen die Vergleichslinien auf (In diesen und den folgenden Betrachtungen sei immer von der Bahnbewegung des Planeten und der Erde um die Sonne ganz abgesehen). In jeder anderen Lage des Spaltes werden sie dagegen nicht parallel zu den Linien des Vergleichsspektrums sein. In dem Spektrum des Planetenrandes, dessen Rotationsbewegung auf die Erde hinzukommt, werden die Linien nach dem DOPPLERSchen Prinzip nach dem violetten Teile, an dem gegenüberliegenden Rande nach dem roten Teile des Spektrums hin verschoben sein. Aus dieser Verschiebung läßt sich die Rotationsgeschwindigkeit der betreffenden Planetenpunkte berechnen.

Nun ist aber folgendes zu beachten. Im Gegensatz zur Rotationsbestimmung der Sonne, die ein selbstleuchtender Körper ist, hat man bei Messungen an Planeten zu berücksichtigen, daß diese in reflektiertem Sonnenlichte leuchten.

¹ Man vgl. hierzu die beiden klassischen Abhandlungen von DUNÉR, Nova Acta Reg. Soc. Sc. Ups. (III) 14, Nr. 13 (1891), (IV) 1, Nr. 6 (1907).

Das ändert die Verhältnisse, wie eine Anwendung des DOPPLERSchen Prinzips zeigt¹

Es reflektiere ein Planet Sonnenlicht nach der Erde, sein Abstand von der Erde sei R , der von der Sonne aber R' . Zum Zeitpunkt $t = 0$ gehe eine Lichtschwingung von der Sonne aus, sie treffe den Planeten und werde von diesem zur Erde reflektiert. Sie langt hier zur Zeit $\frac{R + R'}{V}$ an, wenn mit V die Lichtgeschwindigkeit bezeichnet wird. Die nächste Schwingung geht von der Sonne zur Zeit $t = \tau$ aus, wenn τ die Periode der betrachteten Lichtschwingung ist. Im Verlaufe der Zeit τ haben sich aber die Distanzen R und R' in $R + \tau \frac{dR}{dt}$ und $R' + \tau \frac{dR'}{dt}$ geändert. Die Zeit, zu welcher diese zweite Schwingung auf der Erde eintrifft, ist jetzt

$$\tau + \frac{R + R'}{V} + \tau \left(\frac{dR}{dt} + \frac{dR'}{dt} \right)$$

Die scheinbare Periode ist somit $\tau \left[1 + \frac{1}{V} \left(\frac{dR}{dt} + \frac{dR'}{dt} \right) \right]$, und die Verschiebung der Spektrallinie ist nicht $\frac{dR}{dt}$ proportional, sondern $\frac{dR}{dt} + \frac{dR'}{dt}$.

Dieser Fall liegt bei der Rotationsbestimmung eines Planeten vor, der infolge seiner Rotation eine Radialbewegung sowohl in bezug auf die Sonne wie auf den Beobachter auf der Erde besitzt. Es sei v , die lineare aquatoriale Rotationsgeschwindigkeit eines Planeten. Die Differenz der Geschwindigkeiten für die beiden äußersten Punkte des Aquatorialdurchmessers einer Planetenscheibe ist somit $2v$. Das Licht des Planeten ist aber kein Eigenlicht, es kommt von der Sonne, das Licht, welches die beiden äußersten Punkte des Aquatorialdurchmessers erhalten, ist daher bereits verändert eben durch die Rotation des Planeten in bezug auf die Sonne. Es muß bereits die Differenz $2v$, aufweisen, wenn es in diffuses Licht auf dem Planeten umgewandelt wird. Für einen Beobachter auf der Erde müssen zur Zeit der Planetenopposition somit die beiden äußersten Punkte des Aquatorialdurchmessers eine Geschwindigkeitsdifferenz $4v$, besitzen, d. h. den vierfachen Betrag der wirklichen Rotationsgeschwindigkeit.

Der erste, der auf diese Konsequenz des DOPPLERSchen Prinzips hingewiesen hat, ist C. NIVEN², später E. W. MAUNDER³, H. DESLANDRES⁴ und H. POINCARÉ¹.

Die Rotationsbestimmung wird nun folgendermaßen ausgeführt. Der Spalt des Spektrographen wird so gestellt, daß er im Äquator des Planeten liegt. Dann wird ein Spektrum des Planeten erhalten, dessen Linien, wie bereits oben erwähnt, nicht parallel zu den Linien des Vergleichsspektrums liegen. In der nächsten Ziffer wird gezeigt, daß die durch die Planetenrotation affizierten Spektrallinien gerade Linien bilden, aber eine bestimmte, von der Planetenrotation abhängige Neigung gegen die Linien des Vergleichsspektrums besitzen. Man kann nun die Messungen an den geneigten Linien auf zwei Arten machen.

Wird die Verschiebung der beiden äußersten Punkte der Linien des Planeten gemessen, so wird die lineare, aquatoriale Radialbewegung des Planeten erhalten. W. W. CAMPBELL⁵ gibt für die Berechnung dieser Messungen folgende Formeln an. Es sei

ι der Winkel am Planeten zwischen Sonne und Erde (in den Ephemeriden tabuliert),

ψ , der Winkel, den die Richtung nach der Sonne mit der Ebene des Planeten-Äquators bildet,

¹ C. R. 120, S. 420 (1895)

² M. N. 34, S. 345 (1874)

³ Obs. 8, S. 118 (1885)

⁴ C. R. 120, S. 417 (1895)

⁵ Stellar Motions, S. 94. New Haven 1913

ψ_e der Winkel, den die Richtung nach der Erde mit der Ebene des Planeten-aquators bildet,

V_0 die aquatoriale Rotationsgeschwindigkeit des Planeten in km pro sek,

v_1 die (spektrographische) Radialgeschwindigkeit des Aquatorpunktes an dem einen Rande der Planetenscheibe,

v_2 die Radialgeschwindigkeit des Aquatorpunktes an dem anderen Rande der Planetenscheibe

Dann ist

$$v_1 = V_0 (\cos \psi_e + \cos i \cos \psi_s), \quad v_2 = V_0 (\cos \psi_e - \cos i \cos \psi_s)$$

und damit

$$v_1 - v_2 = 2 V_0 \cos i \cos \psi_s$$

Stehen Sonne und Erde nahe in der Aquatorebene des Planeten, so ist $v_1 - v_2 = 2 V_0 \cos i$, ist ferner der Planet in Opposition oder in oberer Konjunktion, so ist $v_1 - v_2 = 4 V_0$

Hieraus folgt, daß ein äußerer Planet am vorteilhaftesten zur Zeit der Opposition, ein innerer zur Zeit der oberen Konjunktion gemessen wird, weil dann $v_1 - v_2$ den maximalen Betrag von $4 V_0$ besitzt Ähnliche Formeln gab A BELOPOLSKY¹

Die zweite Methode besteht darin², daß man nicht Verschiebungen der Spektrallinien, sondern mit Hilfe eines Positionsmikrometers die Neigung der durch die Planetenrotation beeinflussten Spektrallinien gegen die Vergleichslinien mißt Ist

D die lineare Dispersion für die gemessene Spektrallinie in Å pro mm,

L die Lichtgeschwindigkeit,

ϱ die halbe Breite des Spektrums in mm,

λ die Wellenlänge der Linien,

β der Winkel, den die Richtung nach der Erde (Sonne) mit der Aquatorebene bildet,

so folgt nach J KEELER³

$$V_0 = \frac{\varrho D L \operatorname{tg} \varphi}{2 \lambda \cos \beta}$$

φ wird aus dem Winkelhalbmesser des Planeten und der bekannten Brennweite des Objektivs berechnet, da die Messung auf dem Spektrogramm zu unsicher sein wurde

Diese Methode, die wohl zuerst von DESLANDRES (1895) angewendet wurde, gibt, wie auch J KEELER bestätigt, sehr genaue Resultate

Mehrfach sind Messungen der Rotation von Planeten auf spektrographischem Wege ausgeführt worden, und es hat sich gezeigt, daß z B für Jupiter sowohl nach den Messungen von H DESLANDRES als auch von A BELOPOLSKY¹ die spektrographisch gefundene Rotationsperiode in guter Übereinstimmung mit der ist, die aus direkten Beobachtungen folgt Erstere Methode ist besonders wertvoll für die Planeten, welche keine Oberflächendetails besitzen, so daß ihre Rotation durch direkte Beobachtung des Planeten nicht gefunden werden kann So bestimmten LOWELL⁴ und SLIPHER 1911 auf spektrographischem Wege die Rotationsdauer des Uranus zu $10^3/4$ Stunden, die Rotation findet in retrograder Richtung statt J H MOORE und D H MENZEL⁵ bestätigten 1930 diese Messungen, indem sie die Rotationsdauer zu 10,84 Stunden (retrograd) fanden Diese beiden Beobachter haben ferner versucht, auch die Rotationsdauer des Neptun aus spektrographischen Aufnahmen abzuleiten⁶ Sie geben als provisorischen

¹ A N 139, S 209 (1896)

² C R 120, S 419 (1895)

³ Ap J 1, S 423 (1895)

⁴ Lowell Bull 2, S 17 (1911)

⁵ Publ A S P 42, S 330 (1930)

⁶ Publ A S P 40, S 234 (1928)

Wert der Rotationsdauer 16 Stunden, die Rotation findet in direktem Sinne statt, während sich der Satellit rucklauffig bewegt. Bei Merkur und Venus sind alle Versuche, eine Rotation spektrographisch nachzuweisen, bisher ergebnislos verlaufen.

80. Spektrographische Bestimmung der Rotationsperiode der Saturnringe.

Das schönste Ergebnis der Rotationsbestimmung auf spektrographischem Wege ist der Nachweis, daß der Ring des Saturn nicht wie ein fester Körper rotiert, sondern aus kleinen Teilen bestehen muß, die sich nach den KEPLERSchen Gesetzen um den Saturn herumbewegen. Dieser Nachweis ist von J. KEELER¹ zuerst (1895) geführt worden, und die Ergebnisse KEELERS sind von H. DESLANDRES², A. BELOPOLSKY³ und besonders von W. W. CAMPELL⁴ in vollem Umfang bestätigt worden. Es soll hier ein kurzer Auszug aus den zwei berühmten Abhandlungen von KEELER¹ gegeben werden, die Details sind in den beiden Abhandlungen selbst nachzusehen.

KEELER bestimmt die Gestalt einer Spektrallinie im Spektrum des rotierenden Planeten, wenn der Spalt S in der großen Achse des Ringes liegt. Die Radialbewegung des ganzen Saturnsystems bleibe außer Betracht. Der obere Teil der Abb. 26 stellt das Bild des Saturn auf dem Spalte des Spektrographen dar, die horizontale Linie im unteren Teil von Abb. 26 ist eine unverschobene Spektrallinie, etwa eine Vergleichslinie. Diese Linie werde als x -Achse und die durch ihre Mitte gehende senkrechte Linie (punktiert) als y -Achse genommen. Das rote Ende des Spektrums liege in der $+y$ -Richtung. Kollimator und Kamera des Spektrographen sollen gleiche Brennweite haben, so daß die Breite des Spektrums gleich ist der Länge des beleuchteten Teiles des Spaltes. Ein Punkt der verschobenen Linie habe die Koordinaten x, y , und es sei

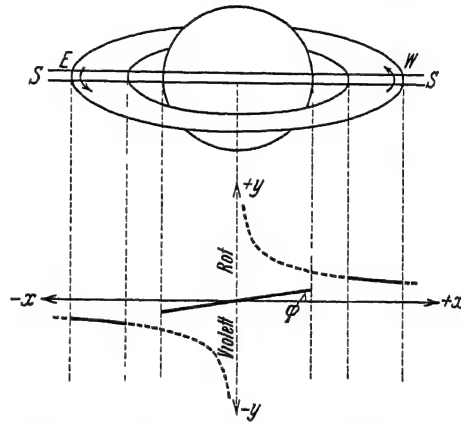


Abb. 26 DOPPLER-Effekt im Spektrum des Saturnrings

v die Radialgeschwindigkeit eines Punktes auf dem Saturn, der dem Punkte x, y entspricht,

V' die Geschwindigkeit eines Punktes im Saturnaquator,

α der Winkel zwischen der Gesichtslinie und dem Radius des Saturn, welcher durch den Punkt geht, der x, y entspricht,

2ϱ die Breite des Spektrums,

β der Winkel, den die Richtung nach der Erde und der Sonne mit der Ebene des Ringes macht, wenn Saturn in oder nahe der Opposition ist.

Die Verschiebung y ist proportional der Radialgeschwindigkeit und man hat, falls mit a ein Proportionalitätsfaktor bezeichnet wird

$$x = \varrho \sin \alpha,$$

$$y = av = a V' \sin \alpha \cos \beta$$

und

$$\frac{y}{x} = \frac{a V' \cos \beta}{\varrho} = \text{konstant} = \operatorname{tg} \varphi \quad (1)$$

¹ Ap J 1, S 416 (1895), 2, S 63 (1895) ² C R 120, S 1155 (1895)

³ A N 139, S 1 (1895) ⁴ Ap J 2, S 127 (1895)

Letztere Gleichung zeigt, daß die Linien im Spektrum eines rotierenden Planeten gerade Linien sind, die aber gegen die Vergleichslinien um den Winkel φ geneigt sind. Diesen Satz hatte bereits H. DESLANDRES¹ gefunden, und er hat ihn auch auf den Fall erweitert, daß der Spalt parallel der Äquatorebene des Planeten ist, aber nicht mit dieser zusammenfällt. Auch in diesem Fall² gilt Gleichung (4). Eine Spektrallinie des Planeten ist in Abb. 26 durch die dick ausgezogene, gegen die x -Achse um den Winkel φ geneigte gerade Linie dargestellt. Man kann aus Gleichung (4) die Größe V' und damit die Rotationsperiode des Planeten bestimmen, falls man den Winkel φ mißt. Es sei L die Lichtgeschwindigkeit (km), λ die Wellenlänge der gemessenen Linie in Å ausgedrückt, D die lineare Dispersion des Spektrums in der Gegend der gemessenen Linie, ausgedrückt in Å pro mm, ϱ die halbe Breite des Spektrums in mm, so folgt aus dem DOPPLER'schen Prinzip

$$y = x \operatorname{tg} \varphi = \frac{2v\lambda}{LD}, \quad v = x \operatorname{tg} \varphi \frac{DL}{2\lambda}$$

und falls man $x = \varrho$ setzt,

$$V' = \frac{\varrho DL \operatorname{tg} \varphi}{2\lambda \cos \beta}$$

Diese Methode der Bestimmung der Geschwindigkeit im Äquator eines Planeten gibt, wie bereits erwähnt, sehr gute Resultate und ist häufig benutzt worden, zuerst wohl von H. DESLANDRES bei der Bestimmung der Rotation des Jupiter.

J. KEELER hat nun weiter die Lage und Gestalt einer vom Ring herrührenden Spektrallinie berechnet, unter der Annahme, daß dieser aus einzelnen, nach den KEPLER'schen Gesetzen um den Saturn sich bewegendem Teilchen besteht.

Ist T die Umlaufzeit eines solchen Teilchens und R seine Entfernung vom Mittelpunkt des Saturnkörpers, so ist nach dem dritten KEPLER'schen Gesetz

$$T^2 = cR^3,$$

oder, da $TV = 2\pi R$ ist,

$$V^2 = \frac{4\pi^2}{cR}$$

Da x proportional R , und y proportional v ($v = V \cos \beta$) ist, läßt sich die vorhergehende Gleichung in der Form schreiben

$$xy^2 = b$$

Diese Kurve ist in Abb. 26 gestrichelt gezeichnet, die dick ausgezogenen Teile geben die Lage und Gestalt einer Spektrallinie des Ringes wieder. Man sieht aus Abb. 26, daß eine Spektrallinie des Ringes keine Fortsetzung einer Linie derselben Wellenlänge ist, welche vom Planeten selbst herrührt. Vergleicht man nun Abb. 26 mit Abb. 27, die auf einer Originalaufnahme des Saturnspektrums von SLIPHER beruht, so sieht man deutlich, daß beide in allen Teilen völlig übereinstimmen. KEELER hat unter Benutzung der Durchmesserbestimmungen des Saturn und seiner Ringe (ϱ und R) sowie aus dem bekannten Werte der Rotationszeit ($10^4,23$) des Planeten nach obigen Formeln die Radialgeschwindigkeiten für den Rand des Planeten und für den Ring berechnet und gefunden, daß diese berechneten Werte in bester Übereinstimmung mit den aus den Radialgeschwindigkeitsmessungen sind. Die genauesten Messungen, die von W. W. CAMPBELL³ herrühren, ergeben für

die Rotationsgeschwindigkeit des Planeten im Äquator 9,77 km (berechnet 10,29 km),

die Geschwindigkeit in der Mitte des Ringsystems 17,37 km (berechnet 18,78 km).

¹ C. R. 120, S. 417 (1895)

² Ap. J. 2, S. 64 (1895)

³ Ap. J. 2, S. 127 (1895)

Die Abb 26 und 27 zeigen, daß die innere Kante des Ringes schneller rotiert als die äußere, und zwar beträgt der Uberschuß rechnungsmaig 3,87 km. Die Beobachtungen ergaben 3,13 km. Nach diesen Resultaten ist kein Zweifel an

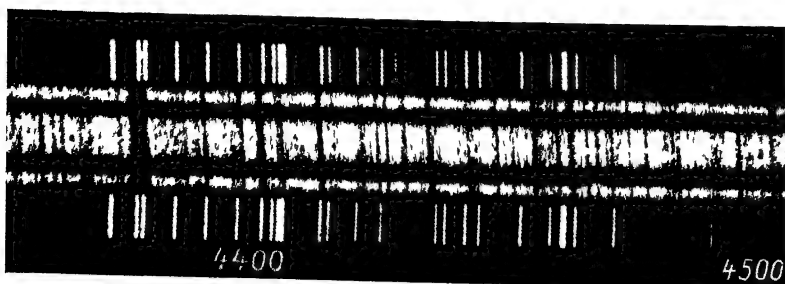


Abb 27 Neigung der Linien im Spektrum des Saturnsystems (nach V M SLIPPER aus NI WOMB ENGLIMANN, Populare Astronomie, VII Aufl.)

der meteorischen Natur des Saturnringes mehr möglich, um so mehr, als auch sehr genaue photometrische Beobachtungen mit dieser Ansicht in vollem Einklang sind. Eine Messung von Radialgeschwindigkeiten hat Aufklärung über die physische Beschaffenheit eines Himmelsobjektes, des Saturnringes, gegeben, gewiß eine merkwürdige Tatsache!

n) Die Bestimmung von Radialgeschwindigkeiten mit dem Objektivprisma

81 Erste Versuche Als E C PICKERING seine berühmte Spektraldurchmusterung, den DRAPER-Katalog, herstellte, erkannte er, welchen großen Vorteil die Verwendung eines guten Objektivprismas für Spektralaufnahmen bietet. Man konnte nicht nur in einer einzigen Aufnahme die Spektren zahlreicher Sterne erhalten, was bei Massenaufnahmen für statistische Untersuchungen, Durchmusterungen usw. eine enorme Arbeitsersparnis bedeutet, sondern darüber hinaus ermöglichte die große Lichtstärke dieses Apparates bei immerhin mäßigen Expositionszeiten die Spektren so schwacher Sterne zu photographieren, welche mit einem Spaltspektrographen überhaupt nicht aufnehmbar sein würden. Während nämlich bei letzterem nur wenige Prozente des durch das Objektiv gesammelten Sternlichtes für die Erzeugung des Spektrums verwendet werden, geht beim Objektivprisma nur ein sehr kleiner Teil des Sternlichtes nutzlos verloren. Es kam PICKERING schon damals der Gedanke, das Objektivprisma auch für die Bestimmung der Radialgeschwindigkeiten nutzbar zu machen, und bereits 1891 machte er verschiedene dahingehende Vorschläge¹. Inzwischen hatte Miss A C MAURY durch Aufnahmen mit dem Objektivprisma die veränderliche Radialgeschwindigkeit von β Aurigae entdeckt², und später wurde auf dem Harvard-Observatorium auch die Doppelsternnatur von ζ Ursae majoris erkannt. PICKERING ist immer wieder auf diesen Gedanken zurückgekommen und hat Versuche in dieser Richtung hin angestellt.

Die Bestimmung von Radialgeschwindigkeiten mit Hilfe des Objektivprismas ist durch den Umstand erschwert, daß sich nicht wie beim Spaltspektrographen das Spektrum einer irdischen Lichtquelle aufkopieren läßt, gegen das die Verschiebung des Sternspektrums gemessen werden konnte. Auch Absorptionsspektren, die eine gewisse Anzahl scharfer Linien besitzen, sind damals und auch

¹ Harv Ann 26, S XXI (1891)

² Harv Ann 26, S XXIV (1891)

heute noch nicht bekannt geworden PICKERING hatte zunächst daran gedacht, die Absorptionslinien der atmosphärischen Luft (tellurische Linien) benutzen zu können, sie erwiesen sich aber als viel zu schwach, auch durfte ihre Gestalt und Wellenlänge von den Druck- und Temperaturverhältnissen der Atmosphäre abhängen, so daß sie schon aus diesem Grunde nicht als Vergleichslinien in Betracht kommen Der nachstliegende Gedanke, das Spektrum eines Sternes mit bekannter Radialgeschwindigkeit neben das des zu untersuchenden Sternes zu photographieren, erwies sich dadurch als unausführbar, daß die Pointierung auf die beiden Sterne absolut gleich sein mußte und auch das Instrument beim Übergang von einem Stern zum anderen keinerlei Veränderungen, wie z B Biegungen, erleiden durfte Das sind praktisch unerfüllbare Bedingungen Der Unterschied in der Pointierung auch bei sorgfältigstem Arbeiten ist wesentlich größer, als es in den weitaus meisten Fällen die Verschiebung der zwei Sterne gegeneinander infolge von Radialgeschwindigkeit ist Zum mindesten mußte eine Marke (Referenzpunkt) auf der Aufnahme vorhanden sein, die den Unterschied in der Pointierung erkennbar und meßbar macht E C PICKERING hat zahlreiche Versuche gemacht¹, einen solchen Referenzpunkt für ein jedes Spektrum auf der Platte durch ein achromatisches Prisma oder Reflexionsprismen herzustellen, die vor dem eigentlichen Objektivprisma befestigt waren (use of a point of reference formed by throwing an auxiliary image of the star into the field by means of a small achromatic prism or by reflecting prisms¹) Diese Versuche sind indessen gescheitert²

82 Benutzung der Neodymlinie PICKERING prüfte dann noch eine andere Methode, die er gleichfalls schon 1891 vorgeschlagen hatte^{3,4} Sie besteht in der Benutzung einer künstlichen Absorptionslinie als Marke Eine Kuvette mit der die Absorptionslinie erzeugenden Lösung wurde vor die photographische Platte gesetzt Es zeigte sich, daß Lösungen eines Neodymsalzes von bestimmter Konzentration, beispielsweise 1 Teil gesättigte Neodymchloridlösung verdünnt mit 5 Teilen Wasser in eine Kuvette von 4 mm lichter Weite, eine einigermaßen scharfe Absorptionslinie geben, deren Wellenlänge von R W WOOD zu 4272,90, bezogen auf das Wellenlangensystem des Eisenspektrums von KAYSER und RUNGE, bestimmt wurde⁵ Die Wellenlänge dieser Linie erwies sich als unabhängig von der Temperatur Es wird aus der Verschiebung der ruhenden künstlichen Absorptionslinie gegen die Linien des bewegten Sterns die Radial-

α Coronae		
M E Z 1912	SCHWARZSCHILD	JORDAN
April 21,6	+27 km	+44 km
22,4	+32	+37
23,6	+25	+23
25,4	+7	+8
26,4	-8	0
27,5	+2	-7
28,4	-13	-12
May 1,5	-32	-22
5,5	-14	-15
14,5	-19	-5
17,4	-15	-18
23,4	-17	-5
30,6	-5	+3
31,6	-7	-4
Juni 1,5	+3	-9
3,5	-4	-17
5,5	-21	-23
8,6	-27	-21

¹ Harv Ann 26 S XXI (1891), Harv Circ 13 (1896)

² Eine ähnliche, aber wesentlich kompliziertere Vorrichtung ist von H DESLANDRES [A N 139, S 241 (1896)] angegeben worden Wie es scheint, hat aber weder DESLANDRES noch ein anderer praktische Versuche mit dieser Anordnung gemacht Das gleiche gilt von zwei sehr komplizierten Anordnungen, welche M HAMY angab [CR 158, S 81 (1914), 167, S 9 (1918)]

³ Harv Ann 26, S XXI (1891)

⁴ Harv Circ 154 = Ap J 31, S 372 (1910)

⁵ Ap J 31, S 376 u 460 (1910) WOOD hat auch noch andere Substanzen untersucht, aber die Linie des Neodymchlorides hat sich doch am geeignetsten erwiesen

geschwindigkeit abgeleitet. E. C. PICKERING hat dieses höchst einfache Verfahren seltenerweise niemals selbst angewendet. Erst SCHWARZSCHILD hat es zur Messung der Radialgeschwindigkeit von α Coronae borealis benutzt¹, um sich ein Urteil über diese Methode durch einen praktischen Versuch zu bilden. SCHWARZSCHILD verglich seine Messungen mit den aus den Elementen von F. C. JORDAN² folgenden Geschwindigkeiten, und es ergab sich daraus für die Messungen mit dem Objektivprisma als wahrscheinlicher Fehler des auf durchschnittlich sechs Spektren beruhenden Abendwertes $\pm 5,7$ km, der wahrscheinliche Fehler des einzelnen Spektrums zu ± 13 km. Die vorstehende Tabelle enthält die von SCHWARZSCHILD gemessenen und die aus den Elementen von JORDAN berechneten Radialgeschwindigkeiten. Die Aufnahmen SCHWARZSCHILDs sind mit einem UV-Flintprisma und einem Zeisschen Triplet ($f = 1494$ mm) gemacht, die Ausdehnung des Spektrums zwischen $H\gamma$ und K beträgt $10,3$ mm.

SCHWARZSCHILD bezeichnet die Resultate als „halbwegs brauchbar“³. Benutzt wurde in einer Kuvette von 10 mm lichter Weite eine Lösung von 1 Teil reinem Neodymchlorid in 6 Teilen Wasser. Fraulein A. LINDSTEDT hatte die Wellenlänge der Neodymlösung dieser Konzentration zu 4272,80 (System ROWLAND) bestimmt. Diese Konzentration erwies sich als besonders günstig, da bei höheren Konzentrationen die Linie unsymmetrisch und damit für Messungen von Radialgeschwindigkeiten unbrauchbar wird⁴. Später hat T. S. GRAHAM⁵ nochmals dieses Verfahren mit einer größeren Zahl (20) von Sternen auf einer Harvardplatte vom März 1915 (Mitte A. R. = $12^h 36^m$, Dekl. = $+40^\circ 30'$) durchgeführt. Drei von den von GRAHAM gemessenen Sternen kommen im Lick General Catalogue vor, und der Vergleich ergibt

	GRAHAM	Lick General Catalogue
$-12^\circ 2307$	$-5,0$ km	$-6,9$ km
B 3321	$+69,0$	$+81$
β Can ven	$9,7$	$+6,9$

also ein etwas günstigeres Resultat, als das von SCHWARZSCHILD. T. S. GRAHAM erörtert die Meß- und Reduktionsmethode ausführlich in der oben erwähnten Abhandlung.

83 Dritte Methode von PICKERING. Noch eine dritte Methode wurde von PICKERING angegeben⁶ und ausprobiert, und sie scheint nach der umfangreichen Untersuchung von SCHWARZSCHILD⁷ die aussichtsreichste zu sein. Das Prinzip dieser PICKERINGSchen sog. „Reversionsmethode“ ist folgendes: Es wird eine Aufnahme einer Sternengegend mittels des Objektivprismas gemacht, dann wird das Prisma um 180° um die Achse der Kamera gedreht und eine zweite Aufnahme derselben Sternengegend auf dieselbe Platte gemacht. Man erhält dann bei geeigneter Einstellung des Instrumentes unmittelbar nebeneinander auf der Platte zwei Spektren eines jeden Sternes, die entgegengesetzt gerichtet sind. Die Radialgeschwindigkeit bewirkt eine Verschiebung beider Spektren gegeneinander, und zwar wird die Wirkung im Vergleich zum einzelnen Spektrum verdoppelt, da die beiden entgegengesetzt laufenden Spektren auch nach entgegengesetzter Richtung verschoben sind. Aus dieser Verschiebung ist die Radialgeschwindigkeit zu bestimmen.

¹ A. N. 194, S. 241 (1913)

² Publ. Allegheny Obs. I, Nr. 12 (1909)

³ Potsdam Publ. Nr. 69, S. 12 (1913)

⁴ Potsdam Publ. Nr. 69, S. 19 (1913)

⁵ J. Can. R. A. S. 12, S. 129 (1918)

⁶ Harv. Circ. 13 (1896), 110 (1906), 154 (1910) = Ap. J. 31, S. 372 (1910)

⁷ Potsdam Publ. Nr. 69 (1913)

Statt das vor dem Objektiv drehbar angebrachte Prisma um 180° zu drehen, kann man bei einem parallaktisch aufgestellten Fernrohr auch die Lage des gesamten Instrumentes wechseln, etwa statt „Achse voran“ bei der zweiten Aufnahme „Achse folgt“ nehmen, ohne das Prisma zu bewegen. Dann ist aber die Kassette um 180° zu drehen.

Das PICKERINGSche Reversionsverfahren gestaltet sich nach SCHWARZSCHILD¹ dann folgendermaßen: „Man denke sich alle Sterne so nahe der Plattenmitte, daß die tatsächlich sehr starke Verzeichnung und Dispersionsverschiedenheit bei verschiedener Lage der Lichtquelle keine Rolle spielt. Man mißt die Abstände zwischen entsprechenden Spektrallinien in den beiden Spektren jedes Sternes. Diese Abstände müssen für alle achsennahen Sterne übereinstimmen, so lange keine Radialgeschwindigkeiten vorhanden sind. Eine Radialgeschwindigkeit bewirkt, wie gesagt, eine Verschiebung der Linien in beiden Spektren des betreffenden Sternes nach entgegengesetzten Richtungen auf der Platte und damit eine Änderung jenes Abstandes, aus der die Radialgeschwindigkeit zu bestimmen ist. Da es praktisch kaum möglich sein dürfte, den Abstand der Spektren, z. B. des Pointiersternes, unveränderlich zu halten oder mit genügender Genauigkeit zu reproduzieren, so ist klar, daß man nur die Unterschiede der Abstände der Spektrallinien von Stern zu Stern zur Bestimmung der Radialgeschwindigkeiten verwerten kann, daß man also auf diese Weise von vornherein nur Aussichten hat, relative Radialgeschwindigkeiten der Sterne jeder Platte zu gewinnen.“

Es soll jetzt das rechnerische Verfahren — immer noch unter Beschränkung auf den Idealfall achsennaher Sterne — näher dargelegt werden. Man zahle die x -Koordinate parallel der Richtung der Spektren, und zwar in Richtung wachsender Wellenlänge der Spektren der ersten Aufnahme. Es sei x der Wert der Koordinate für eine bestimmte Wellenlänge im ersten Spektrum eines Sternes, x' der Wert für dieselbe Wellenlänge im zweiten Spektrum. Was der Messung unterliegt, ist dann der Abstand $s = x - x'$ für eine Reihe von Wellenlängen für jeden Stern. Für einen Stern ohne Radialgeschwindigkeit würde gelten

$$s = x - x' = \alpha + M(\lambda),$$

wo α eine von der Einstellung des Instrumentes bei beiden Aufnahmen abhängige Konstante, $M(\lambda)$ eine Funktion der Wellenlänge ist, welche die doppelte Länge des vom Prisma entworfenen Spektrums, von irgendeiner Wellenlänge an gezählt, oder kurz gesagt, die ‚doppelte Dispersion des Prismas‘ bezeichnet. Hat der Stern die Radialgeschwindigkeit v in Teilen der Lichtgeschwindigkeit, so geht λ über in $\lambda(1 + v)$, und an Stelle der vorstehenden Gleichung tritt die andere

$$s = x - x' = \alpha + M(\lambda) + vL(\lambda),$$

wo zur Abkürzung

$$L(\lambda) = \lambda \frac{\delta M}{\delta \lambda}$$

gesetzt ist.

Man wird nun praktisch so verfahren. Man mittelt für jede Wellenlänge die Messungen sämtlicher Sterne. Indem man diese Mittelung durch Überstreichen kennzeichnet, erhält man

$$\overline{x - x'} = \alpha + M(\lambda) + L(\lambda)\bar{v} = H(\lambda),$$

wo \bar{v} die mittlere Radialgeschwindigkeit der Sterne der Platte ist. Diese Größe $H(\lambda)$ stellt die tatsächliche mittlere Länge der Spektren auf der Platte — kurz gesagt, die mittlere Dispersion — dar. Man erhält aus der Beobachtung den Wert von $H(\lambda)$ für eine Anzahl diskreter Spektrallinien. Man wird dann in

¹ Potsdam Publ. Nr. 69, S. 9 (1913)

der Praxis so verfahren, daß man auf Grund einer HARTMANNSchen Dispersionsformel eine „normale“ Dispersion ableitet, die Abweichung der tatsächlichen Dispersion $H(\lambda)$ von der normalen bildet, graphisch aufträgt und durch eine glatte Kurve ausgleicht. Natürlich ist dabei Identifikation der Linien vorausgesetzt.

Ist $H(\lambda)$ bekannt, so kann man es von jedem gemessenen Linienabstand $\nu - \nu'$ subtrahieren und erhält

$$\nu - \nu' - H(\lambda) = L(\lambda)(\nu - \bar{\nu})$$

Jede Linie in jedem Sternspektrum gibt eine solche Gleichung für $\nu - \bar{\nu}$. Das in geeigneter Weise gebildete Mittel aus den Einzelwerten $\nu - \bar{\nu}$ für jeden Stern gibt die Radialgeschwindigkeit des Sternes, bezogen auf die mittlere Radialgeschwindigkeit aller Sterne der Platte.

Wesentlich komplizierter gestaltet sich das Verfahren für die nichtachsen-nahen Sterne. SCHWARZSCHILD hat die allgemeine, „elementare, aber muhsame Theorie des Objektivprismas“ in der schon mehrfach erwähnten Abhandlung gegeben, auf sie soll hier besonders hingewiesen werden, da sich ein kurzer Auszug aus ihr nicht machen läßt. Da einer der Hauptvorteile dieser Art der Bestimmung von Radialgeschwindigkeiten gerade darin besteht, daß man diese für eine große Zahl von Sternen durch Bearbeitung nur einer Platte erhält, also in der Hauptsache mit Spektren außerhalb der Achse zu tun hat, stellt SCHWARZSCHILDs Abhandlung eine grundlegende Vorarbeit für alle derartigen Untersuchungen dar.

Durch eine Kombination der Reversionsmethode mit der Neodymfiltermethode hat SCHWARZSCHILD auch die absoluten Radialgeschwindigkeiten mit dem Objektivprisma bestimmen können. Ein gleiches ist möglich, wenn die Platte Sterne enthält, deren Radialgeschwindigkeiten bekannt sind. Beide Fälle sind von SCHWARZSCHILD theoretisch behandelt und an der Hand einiger wirklichen Aufnahmen geprüft und erläutert worden. Vergleicht man seine Resultate mit den Angaben des Lick General Catalogue, so ergibt sich folgende Zusammenstellung:

α Cygni Gegend ¹			Hyaden				
BOSS	SCHWARZSCHILD	Lick G C	BOSS	SCHWARZSCHILD			Lick G C
5283	25 km	22 km	1000	+34 km	+32 km	+22 km	+38 km
5316	4	15	1029	+48	+21	+30	+35
5317	39	32	1036	+20	+37	+26	+32
5361	18	7	1055	+56	+53	+53	+39
5365	23	22	1056	+2	+33	+27	+39
41", 3617	19	14					
5575	1	16	Platte	1593	1933	1937	

Als Schlusseergebnis seiner Untersuchungen sagt SCHWARZSCHILD³ „Die mitgeteilten Beobachtungen und ihre Reduktion sind in erster Linie Beispiele für die theoretischen Ableitungen. Da ich alle Messungen und Rechnungen selbst ausführte, sind sie nicht so zahlreich geworden, daß sie ein abschließendes Urteil über die Methode ermöglichen. Immerhin scheint mir, daß die Möglichkeit, Radialgeschwindigkeiten aus einer Platte mit einem wahrscheinlichen Fehler von 7 km/sec zu gewinnen, dargetan und der absolute Skeptizismus widerlegt ist. Der ersuchte Königsweg zur Bestimmung zahlreicher Radialgeschwindigkeiten mittels des Objektivprismas dürfte endlich in der Reversionsmethode schwerlich gegeben sein. Der Arbeitsaufwand, der dabei auf den einzelnen Stern

¹ Potsdam Publ Nr 69, S 40 (1913)

² Potsdam Publ Nr 69, S 41 (1913)

³ Potsdam Publ Nr 69, S 6 (1913)

kommt, ist im Verhältnis zur erzielten Genauigkeit viel zu erheblich.“ Hierzu mag noch bemerkt werden, daß die von SCHWARZSCHILD behandelten Platten mit einem für diese Aufgabe ziemlich ungeeigneten Instrument aufgenommen worden sind, es wäre daher erwünscht, wenn eine weitere sorgfältige, auf größerem Material beruhende Untersuchung unternommen würde. Erst dann ließe sich ein sicheres Urteil über den Wert von Radialgeschwindigkeitsbestimmungen mit Hilfe eines Objektivprismas fällen.

Es mag noch erwähnt werden, daß SCHWARZSCHILD bei diesen Untersuchungen einen spektroskopischen Doppelstern, 63 Tauri, auffand, dessen Variabilität durch Aufnahmen mit einem Spaltspektrographen bestätigt wurde¹.

84. Die Methode von PICKERING-ORBINSKY. Aus historischen Gründen werde schließlich noch eine letzte Methode behandelt, die gleichfalls von PICKERING herrührt und dann besonders von A. ORBINSKY² empfohlen wurde, praktisch aber völlig versagt hat³.

ORBINSKY, der diese Methode ausführlicher behandelt hat, schlägt folgendes Verfahren vor. Es sei V die Lichtgeschwindigkeit, v die Radialgeschwindigkeit des Sterns. Nach dem DOPPLERSCHEN Prinzip ist dann

$$\Delta\lambda = \frac{v}{V} \lambda,$$

wenn $\Delta\lambda$ die Veränderung der Wellenlänge λ infolge der Radialgeschwindigkeit v ist. Bezeichnet nun n die Zahl der Umdrehungen der Meßschraube für $1 \mu\mu$, so hat man für die zwei Wellenlängen λ_1 und λ_2 die Ausdrücke

$$d\lambda_1 = n_1 \Delta\lambda_1 = n_1 \lambda_1 \frac{v}{V},$$

$$d\lambda_2 = n_2 \Delta\lambda_2 = n_2 \lambda_2 \frac{v}{V},$$

und hieraus folgt

$$v = \frac{d\lambda_1 - d\lambda_2}{n_1 \lambda_1 - n_2 \lambda_2} V$$

als absolute Radialgeschwindigkeit des Sternes, wenn die Distanzen $d\lambda_1$ und $d\lambda_2$ relativ zu den Spektrallinien einer unbewegten Lichtquelle gemessen sind. Photographiert man nun mittels des Objektivprismas neben das Spektrum des zu untersuchenden Sternes das eines Sternes mit bekannter Radialgeschwindigkeit, so kann man $d\lambda_1$ und $d\lambda_2$ messen, und zwar sind dies differentielle Messungen, die sich mit großer Genauigkeit ausführen lassen, man erhält somit die Radialgeschwindigkeit des zu untersuchenden Sternes, bezogen auf den Stern mit bekannter Radialgeschwindigkeit. Natürlich müssen die Wellenlängen λ_1 und λ_2 korrigiert werden für die Geschwindigkeit des Vergleichssterne. Für die Ausübung dieses Verfahrens ist es wichtig, daß das Objektivprisma eine möglichst hohe Dispersion besitzt, und daß man für die Messungen einen möglichst großen Wellenlangenbezirk benutzt.

Diese Methode benutzt also die Veränderung der Dispersion im Spektrum infolge vorhandener Radialgeschwindigkeit, also einen Effekt höherer Ordnung gegenüber der Verschiebung der Spektren gegeneinander infolge von Radialgeschwindigkeit, und man kann sich nicht wundern, daß Radialgeschwindigkeitsbestimmungen auf diesem Wege sich nicht auch nur mit einiger Sicherheit ausführen lassen, um so mehr, als meistens die Dispersion von Objektivprismen relativ klein ist. Eine wirkliche Ausführung dieses Verfahrens in der Praxis ist bisher nicht veröffentlicht worden.

¹ Potsdam Publ. Nr. 69, S. 42 (1913), A. N. 196, S. 117 (1913).

² A. N. 138, S. 9 (1895).

³ Ap. J. 31, S. 372 (1910) = Harv. Circ. 154 (1910).

Apparate und Methoden zur Messung der Gesamtstrahlung der Himmelskörper.

Von

WALTER E. BERNHEIMER-Wien

Mit 53 Abbildungen

a) Allgemeines zur Messung der Gesamtstrahlung

1 Einleitende Bemerkungen Je nach dem verwendeten Meßapparat erfassen die Strahlungsmessungen die von den Himmelskörpern emittierte Energie in einem engeren oder breiteren Spektralbezirk. Dabei ist es natürlich, daß der Meßapparat, z. B. das Auge oder die Photozelle, die Wirkung der Emissions- und Absorptionslinien sowie des kontinuierlichen Untergrundes des betreffenden Spektralbezirktes nicht zu trennen vermag. Ferner ist hervorzuheben, daß eine direkte Vergleichung der Messungsergebnisse verschiedener Apparattypen unzulässig ist, da die Empfindlichkeitsfunktion $A(\lambda)$ für jeden Apparat verschieden ist. Strenggenommen setzt sich die Funktion $A(\lambda)$ noch aus zwei Komponenten zusammen, aus $e(\lambda)$, der Empfindlichkeitsfunktion des eigentlichen Strahlungsempfängers, und $o(\lambda)$, dem Durchlassigkeitsvermögen der gesamten Optik, die von der Strahlung auf dem Wege zum Empfänger passiert werden muß. Solange es sich um Relativmessungen handelt, pflegt man $e(\lambda)$ und $o(\lambda)$ zu vernachlässigen, prinzipiell fehlt aber hierfür die Berechtigung.

In Erweiterung der Aufgaben der selektiven Strahlungsmessungen bezwecken die Messungen mit nichtselektiven Apparaten, z. B. mit Bolometer, Thermoelement, Radiometer, die vereinigte Energie aller Wellenlängen oder in Verbindung mit einem Spektralapparat die Energiekurve im ganzen Wellenlängenbereich festzustellen. Auf der Erde ist diese Aufgabe nicht restlos zu erfüllen, da die Atmosphäre der Beobachtung der Strahlung der Himmelskörper sowohl im kurzwelligen als auch im langwelligen Gebiete eine Grenze setzt. Will man Absolutwerte der Strahlung erhalten, so muß man für den nicht beobachteten ultravioletten und infraroten Anteil Korrekturen ermitteln, ein ungemein schwieriges und unbefriedigendes Beginnen, das eigentlich nur dann exakt wäre, wenn die fixsterne schwarze Strahler wären (s. z. B. diesbezügliche Korrekturen bei der Ermittlung der Gesamtstrahlung der Sonne, Ziff. 15 u. 17). Durch die Wirkung der Erdatmosphäre treten aber auch in den von den Meßapparaten erfaßbaren Spektralgebieten Störungen auf derart, als wäre die Atmosphäre selbst ein selektives Filter (s. Abb. 38 in Ziff. 33). In der Bestimmung der Funktion $a(\lambda)$, des Transmissionskoeffizienten der Erdatmosphäre, liegt die wichtigste Aufgabe für extraterrestrische bzw. absolute Strahlungsmessungen. Während diesem Probleme bei den Untersuchungen der Sonnenstrahlung stets größte Aufmerksamkeit geschenkt wird — ohne daß es freilich bis heute gelungen ist, die auf-

tretenden Schwierigkeiten gänzlich zu überwinden —, findet man bei den Gesamtstrahlungsmessungen der Fixsterne im allgemeinen nur gewisse Ansätze zur Berücksichtigung der Funktion $a(\lambda)$. Es ist daher in den meisten Fällen noch verfrüht, von Ergebnissen absoluter Strahlungsmessungen zu sprechen, unter keinen Umständen aber dann, wenn die Meßdaten überhaupt nur auf das Zenit (Luftmasse $m = 1$) reduziert worden sind.

Werden für spezielle Untersuchungen Filter verwendet, so muß man auch noch eine entsprechende Funktion $f(\lambda)$ berücksichtigen. Man kann demnach, wenn $E(\lambda)$ die gemessene Strahlung, $E_0(\lambda)$ die wahre extraterrestrische Strahlung des Himmelskörpers und K eine Konstante bedeuten, folgenden Ansatz machen:

$$E(\lambda) d\lambda = K E_0(\lambda) d\lambda A(\lambda) a(\lambda) f(\lambda)$$

Sind alle Funktionen festgelegt, so erhält man aus der Gesamtstrahlungsmessung einen absoluten Energiewert, der in $\text{gcal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$, oder durch Multiplikation mit

$$\frac{4,1863}{60} \times 10^7 = 0,6977 \times 10^6$$

in $\text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ ausgedrückt wird. Für die Sonne erhält man nach den letzten Daten (Ziff 20) der Smithsonian-Institution

$$\int_0^\infty E_0 d\lambda = 1,940 \text{ gcal cm}^{-2} \text{min}^{-1} = 1,3535 \times 10^6 \text{ erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$$

für Beteigeuze, α UMa und Boss 2935 auf Grund der Mt. Wilson-Beobachtungen (Ziff 33) die naturgemäß weniger sicheren Werte¹

Tabelle 1

Stern	Sp	m_v	m_r	$\text{gcal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$	$\text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$
α Ori	M2	+0 ^m 92	-1 ^m 67	132,4 10^{-12}	92,37 10^{-6}
α UMa	G8	+1 ,95	+1 ,11	9,1 10^{-12}	6,35 10^{-6}
Boss 2935	M2	+7 ,6	+5 ,36	0,2 10^{-12}	0,14 10^{-6}

Nach Laboratoriumseichungen sind die entsprechenden Daten für einen Stern der radiometrischen Größe $m_r = 0$

$$17,3 \cdot 10^{-12} \text{ gcal cm}^{-2} \text{min}^{-1} = 12,07 \cdot 10^{-6} \text{ erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$$

Die Hauptaufgabe der Gesamtstrahlungsmessungen mit nichtselektiven Instrumenten besteht wohl in der Festlegung absoluter Energiewerte². Daneben sind aber die Messungen mit solchen Apparaten auch noch deshalb von Bedeutung, weil es bei Verwendung geeigneter Filter möglich ist, speziellen Aufschluß über die infrarote Strahlung der Himmelskörper zu gewinnen. Inwieweit es gelungen ist, auch mit Hilfe von selektiven Meßapparaten, wie lichtelektrische Zelle und photographische Platte, in das langwellige Spektralgebiet einzudringen, wird in Abschnitt b) dargelegt werden.

2 Das Prinzip der Meßapparate Bei den astrophysikalischen Untersuchungen der Gesamtstrahlung kommen je nach der Aufgabe die verschiedensten Apparate zur Anwendung. Eine Reihe von Instrumenten dient ausschließlich

¹ Die Definition der radiometrischen Helligkeit (Großenklasse) m_r ist in der Ziff 3 gegeben.

² Die weitere Aufgabe aus den Ergebnissen der Strahlungsmessungen Sterntemperaturen abzuleiten wird von A. BRILL in dem Kapitel „Die Temperatur der Fixsterne“, des Handb. Bd V/1, behandelt. Siehe auch Bd IV, Kap. 1 „Strahlung und Temperatur der Sonne“, Beitrag von W. E. BERNHEIMER, und Bd II/1, Kap. 4 „Spektralphotometrie“, Beitrag von A. BRILL.

für Strahlungsmessungen der Sonne. Es sind dies vor allem die Pyrheliometer. Daneben gibt es noch zahlreiche aktinometrische Meßinstrumente, die zu rein meteorologischen Aufgaben herangezogen werden, bei denen also von vornherein auf extraterrestrische Strahlungswerte verzichtet wird.

Die sog sekundären Pyrheliometer sind einfache, nach dem Kalorimeterprinzip arbeitende Anzeiginstrumente der Wärmestrahlung. Die gemessene Temperaturzunahme eines Präzisionsthermometers wird der auffallenden Wärmepyrheliometer, wie das K. ÅNGSTRÖMSche Kompensationspyrheliometer (Ziff 9) und die amerikanischen sog Water-Flow- und Water-Stir-Pyrheliometer (Ziff 10), die als Standardinstrumente für absolute Sonnenstrahlungsmessungen herangezogen werden. Bei diesen Typen verwendet man Thermoelemente bzw Platinwiderstandsthermometer in Verbindung mit einem „schwarzen Körper“ als Empfänger. Die Thermoelemente bzw Widerstandsthermometer versehen hier also nur den Dienst als Hilfsmittel. Ähnliches gilt hinsichtlich der Thermoelemente für das Pyranometer (Ziff 16), einen Apparat zur Messung der Himmelsstrahlung, der wegen seiner nunmehrigen Verwendung für Solarkonstantenbestimmungen nach der sog kurzen Methode (Ziff 17) ebenfalls als ein astrophysikalisches Meßinstrument bezeichnet werden kann.

Das Bolometer bzw Spektrobolometer (Ziff 12 und 13) dient für Sonnenstrahlungsmessungen, wurde aber auch schon für Strahlungsmessungen der Fixsterne herangezogen (Abschnitt 1). Das Bolometer ist im Prinzip ein Widerstandsthermometer. In einer Wheatstoneschen Brücke werden zwei Zweige durch dünne geschwarzte Metallstreifen von hohem Temperaturkoeffizienten (z B aus Platin, Nickel) gebildet, einer von ihnen dient als Empfänger. Die anderen beiden Zweige der Brücke sind Manganindrähte. Die durch Bestrahlung des Empfängers bewirkte Widerstandsänderung der Brücke wird galvanometrisch gemessen.

Die Hauptinstrumente¹ für nichtselektive Strahlungsmessungen der Fixsterne sind Thermoelemente, Radiomikrometer und Radiometer. Im Gegensatz zum Bolometer entfällt bei diesen Typen eine Batterie als Stromquelle. Thermoelemente, die je nach der Aufgabe einzeln oder zu sog Thermosaulen vereinigt verwendet werden, bestehen aus dünnen Drahten verschiedener Legierung, die an den Enden zusammengelötet sind. An den Lotstellen bilden kleine Scheibchen (meist aus Zinn) die eigentlichen Empfänger bei den astrophysikalischen Messungen. Man bezeichnet das bestrahlte Scheibchen als warme oder aktive, das unbestrahlte als kalte oder inaktive Lotstelle. Die bei der Bestrahlung eines Empfängerscheibchens aus der Temperaturdifferenz der „warmen“ und „kalten“ Lotstelle sich entwickelnde Thermokraft wird galvanometrisch gemessen (s Ziff 29 bis 33 und 40). Mitunter werden abwechselnd beide Empfängerscheibchen bestrahlt, womit eine Verdoppelung des Galvanometeraus-schlages verbunden ist (vgl Abb 37, Ziff 33).

Radiometer und Radiomikrometer werden in der Literatur vielfach nicht auseinandergehalten oder auch miteinander verwechselt², sind aber nach Aufbau und physikalischer Wirkungsweise völlig wesensverschieden.

Das Radiomikrometer ist die Kombination eines Thermoelementes mit einer in einem Magnetfeld hangenden Drahtschleife. Die von der Erwärmung der Lotstelle ausgeloste Thermokraft bewirkt einen Strom in der Schleife. Die nun-

¹ Zahlreiche Literaturangaben finden sich u a in W. W. COBLENTZ, J Opt Soc Amer 5, S 131 (1921) und in derselben Zeitschrift 7, S 439 (1923).

² Zum Beispiel MÜLLER-POUILLET, Lehrbuch d Phys V/2, Phys d Kosmos, S 61 u 272 Braunschweig 1928.

mehr einsetzende BIOT-SAVARTSche Kraft dreht die Drahtschleife in die Richtung senkrecht zum Magnetfelde, in entgegengesetzter Richtung macht sich das Bestreben des Aufhängefadens bemerkbar, die Ruhelage wieder zu erreichen. Der bei dem schließlich erfolgenden Ausgleich der Kräfte sich ergebende Torsionswinkel der Schleife dient als Maß der einstrahlenden Energie (s. Ziff. 27).

Das Radiometer, wie es bei astrophysikalischen Untersuchungen verwendet wird, beruht auf Neukonstruktionen der CROOKESschen Lichtmühle. In einem evakuierten Gefäß sind die Radiometerflügel, an den Vorderseiten geschwarzte Scheibchen, drehbar an einem Quarzdraht aufgehängt. Bei Bestrahlung der Vorderseite eines Flügels setzt eine Drehung des Radiometers ein, hervorgerufen durch den Ruckstoß der auftreffenden Gasmoleküle (Radiometerkraft). In entgegengesetzter Richtung sucht der Aufhängefaden wieder in die ursprüngliche Lage zurückzukehren. Der Drehungswinkel, angezeigt durch die Stellung eines am Radiometer befestigten Spiegelchens, ist ein Maß der zu untersuchenden Strahlungsintensität.

Wie bereits angedeutet, werden in der Literatur die genannten Instrumente und die mit ihnen ausgeführten Messungen der Gesamtstrahlung nicht immer richtig unterschieden. So spricht man mitunter von radiometrischen Messungen und meint Untersuchungen mit einem Radiometer, man erwähnt radiometrische Messungen, das verwendete Instrument war aber kein Radiometer, sondern ein Thermoelement.

Prinzipiell sollten die Messungsergebnisse der Gesamtstrahlung, gleichgültig, ob sie mit Thermoelement, Radiometer oder Radiometer gewonnen sind, als radiometrische Helligkeiten (s. die Definition in Ziff. 3) bezeichnet werden. 1925 lehnt W. W. COBLENTZ¹ die Bezeichnung bolometrische Großenklasse deshalb ab, weil das Bolometer nur eines von mehreren nichtselektiven Instrumenten sei. Eine scharfe Unterscheidung der Begriffe radiometrische und bolometrische Helligkeit muß aber vor allem aus folgenden Gründen vorgenommen werden.

Radiometrische Helligkeiten sind die Ergebnisse der Messungen der Gesamtstrahlung der Sterne, wobei es gleichgültig ist, welcher Instrumente man sich bei der Beobachtung bedient hat. Als bolometrische Helligkeiten bezeichnet man dagegen die theoretischen Idealwerte der Gesamtstrahlung. Sie haben demnach mit dem Bolometerinstrumente nichts zu tun und können überhaupt niemals durch direkte Messungen erfaßt werden, da die Voraussetzung fehlt, daß die in Ziff. 1 genannten Funktionen $A(\lambda)$, die Empfindlichkeitsfunktion der ganzen Apparaturen, und $a(\lambda)$, der Transmissionskoeffizient der Atmosphäre, Konstanten sind.

Die auf dem Mt. Wilson durch thermoelektrische Messungen gewonnenen radiometrischen Helligkeiten (s. Ziff. 33) sind unter gewissen vereinfachten Annahmen in bolometrische Helligkeiten (s. folgende Ziffer) umgewandelt worden. Die notwendigen Reduktionen in strengerer Weise durchzuführen, wird eine dankbare Aufgabe für die Zukunft sein.

3 Definition der Begriffe bolometrische und radiometrische Größe, Wasserzellenabsorption und Wärmeindex. Als theoretisches Maß für die absolute Gesamtstrahlung wird die bolometrische Helligkeit m_b , ausgedrückt in Großenklassen, eingeführt², wobei, wie in Ziff. 2 hervorgehoben, die Wellenlangenabhängigkeit der Apparatur fortfällt. Zur Reduktion bolometrischer Helligkeiten auf ein System, das auf Beobachtungen beruht und bei dem demnach die Funktionen $A(\lambda)$ und $a(\lambda)$ auftreten, bedarf es der Einführung von Korrek-

¹ J. Franklin Inst. 1925, S. 5

² A. S. EDDINGTON, Z. f. Phys. 7, S. 251 (1921)

tionen, die vom Spektraltypus des strahlenden Sternes abhängig sein werden. Nimmt man an, daß die Sternstrahlung dem PLANCKschen Gesetz folge, so können die genannten Korrekturen in ihrer Beziehung zu c_2/T , d. h. zur effektiven Temperatur der Sterne, dargestellt werden. Die Korrektur wird ein Minimum bei einem Stern jener effektiven Temperatur aufweisen, die der Temperatur eines schwarzen Körpers gleichkommt, der für die betreffende Apparatur die maximale Wirksamkeit aufweist. Für den Augenapparat ist dies nach EDDINGTON die Temperatur von 6500° . Die hinsichtlich des Nullpunktes natürlich willkürliche bolometrische Großenskala wird nun so festgesetzt, daß für Sterne der effektiven Temperatur von 6500° die Korrektur verschwindet, also $m_b = m_v$ wird. Die erste Korrektortabelle, berechnet nach NUTTINGS¹ Messungen für die Energien im visuellen System, wurde 1921 von A. S. EDDINGTON² veröffentlicht und 1923 von K. F. BOTTLINGER³ erweitert. 1924 hat J. HOPMANN⁴ im Zusammenhang mit seinen kolorimetrischen Untersuchungen eine Tabelle gegeben, die von den früheren nur wenig verschieden ist. In Tabelle 2 findet sich die Korrektortabelle, die EDDINGTON zuletzt veröffentlicht hat⁵. Die Differenzen gegenüber der ersten Tabelle EDDINGTONS sind nur unbedeutend und betragen für $T_{eff} = 3000^\circ$ $0^m,04$, für 6000° $0^m,02$ und für 12.000° , die letzte in der ersten Tabelle angeführte Temperatur, $0^m,05$.

Tabelle 2
Tabelle der Korrekturen $m_b - m_v$ für verschiedene T_{eff} (nach EDDINGTON)

T_{eff}	$m_v - m_i$	T_{eff}	$m_v - m_i$	T_{eff}	$m_b - m_v$
2500°	$2^m,71$	6000°	$-0^m,02$	11500°	$-0^m,50$
2750	$2^m,15$	6500	$-0^m,00$	12000	$-0^m,58$
3000	$1^m,67$	7000	$-0^m,00$	13000	$-0^m,73$
3250	$1^m,52$	7500	$-0^m,02$	14000	$-0^m,89$
3500	$1^m,05$	8000	$-0^m,06$	15000	$-1^m,04$
3750	$0^m,80$	8500	$-0^m,10$	16000	$-1^m,19$
4000	$0^m,62$	9000	$-0^m,16$	17000	$-1^m,34$
4250	$0^m,47$	9500	$-0^m,22$	18000	$-1^m,49$
4500	$0^m,35$	10000	$-0^m,29$	19000	$-1^m,63$
5000	$0^m,18$	10500	$-0^m,36$	20000	$-1^m,77$
5500	$0^m,08$	11000	$-0^m,43$		

In gleicher Weise wie zwischen bolometrischem und visuellem System wurde auch eine Beziehung zwischen bolometrischem und radiometrischem System der Gesamtstrahlungsmessungen aufgestellt. Vorher mußte natürlich die Umwandlung der radiometrischen Messungsergebnisse in ein Größenklassensystem und die Festlegung des Nullpunktes dieser radiometrischen Großenskala erfolgen.

Während z. B. bei den thermoelektrischen Untersuchungen von COBLENTZ (s. Ziff. 31) nun die bei den einzelnen Sternen erzielten Galvanometerauslässe veröffentlicht wurden, haben PRUITT und NICHOLSON⁶ ihre Messungsergebnisse in ein radiometrisches Größenklassensystem eingeordnet. Die gewählte Bezeichnung „radiometrische Größenklasse“ stammt aus dem Jahre 1922⁷. Zur Definition des Nullpunktes wurde festgelegt: Es soll die radiometrische Größe eines Sternes S gleich sein der visuellen Größenklasse eines typischen A0-Sternes, der den bei S beobachteten Galvanometerausschlag ergeben würde. Als Standardstern der Klasse A0 wählte man α Lyri ($m_v = 0,14$), der bei den ersten Versuchen am Hooker-Spiegel einen Aus Schlag von 42,41 mm hervorgerufen hatte. Bei-

¹ Phil. Mag. (6) 29, S. 304 (1915) ² Z. f. Phys. (1) c)

³ Behn-Babalsberg Veroff. 3, Nr. 4 (1923) ⁴ A. N. 222, S. 232 (1924)

⁵ Der innere Aufbau der Sterne, Tab. 16, S. 171, Berlin 1928

⁶ Ap. J. 68, S. 279 (1928) ⁷ Publ. A. S. P. 34, S. 181 (1922)

spielsweise gab nun R Leo ($m_v = 9^m,2$, Md) einen Ausschlag von 17,56 mm. Einen gleich großen Ausschlag erzielt aber ein A0-Stern der visuellen Helligkeit $m_v = 1^m,10$. Es ist demnach die radiometrische Größenklasse von R Leo $m_r = 1^m,1$.

Die derart definierte radiometrische Helligkeit berücksichtigt weder $a(\lambda)$ noch $A(\lambda)$ (s. Ziff 1), es ist daher unter keinen Umständen zulässig, etwa in einem derartigen Falle von bolometrischen Helligkeiten zu sprechen.

In der bereits genannten Veröffentlichung aus dem Jahre 1922 werden auch Wärmeindex (W I) und Wasserzellenabsorption definiert. Es ist

$$W I = m_v - m_r,$$

wobei 1928 noch genauer festgelegt wurde¹, daß sowohl bei m_r wie bei m_v die Zenitreduktion (Reduktion auf Luftmasse $m = 1$ Mt Wilson), bei m_r überdies die Reduktion auf ein Steinsalzfenster des Empfängergefäßes und auf einen bestimmten Reflexionszustand der beiden verwendeten Spiegel durchgeführt wird. Nach der oben angeführten Definition ist also für den Standardstern der Spektralklasse A0 der Wärmeindex gleich Null.

Durch Verwendung einer Wasserzelle von 1 cm Dicke als Filter (s. Ziff 31 und 33) gewinnt man die sog. Wasserzellenabsorption (W Z A), die folgendermaßen abgeleitet wird. Es ist der in Größenklassen ausgedruckte Bruchteil der von der Wasserzelle absorbierten Strahlung

$$W Z A = 0,4 \log \frac{\text{Galvan -Ausschlag ohne Zelle}}{\text{Galvan -Ausschlag mit Zelle}}$$

Bei der W Z A ist eine Zenitreduktion nicht eingeschlossen, da für die beobachteten Zenitdistanzen die Differentialextinktion als unbedeutend angenommen wurde. Für die Ableitung von Sterntemperaturen (s. ds. Handb. V/1, Kap 3 A BRILL, Die Temperaturen der Fixsterne, Ziff 22) ist die W Z A dem W I insofern überlegen, daß die Empfindlichkeitsfunktion der W Z A sicherer festgelegt werden kann, als die in den W I eingehende Empfindlichkeitsfunktion des Augenapparates.

In die oben definierten Größenklassenskalen der radiometrischen Helligkeit, des W I und der W Z A, läßt sich auch die Meterkerze einordnen. Im System des Mt Wilson ist für diese Standard-Lichtquelle $m_r = -20^m,00$, der W I $5^m,82$, wenn m_v zu $-14^m,18$ angenommen wird² und die W Z A zu $2^m,7$.

Der Zusammenhang zwischen bolometrischen und radiometrischen Helligkeiten ist schließlich durch folgenden Ausdruck gegeben

$$m_b = m_r - \Delta m_r + (W I^* + \Delta m_r^*)$$

Hier bedeuten Δm_r die an die beobachtete radiometrische Größe m_r anzubringende Korrektur für $A(\lambda)$, den Strahlungsverlust in der Apparatur, und $a(\lambda)$, den Transmissionskoeffizienten der Erdatmosphäre. Die im Klammerausdruck zusammengefaßte additive Konstante dient zur Festlegung des Skalennullpunktes und bedeutet den W I plus der Reduktionsgröße auf extraterrestrische Strahlung für den Standardstern, dessen bolometrische Helligkeit gleich der radiometrischen angenommen wird. E. PETTIT und S. B. NICHOLSON¹ bestimmten den Nullpunkt aus radiometrischen Daten von Procyon, ϵ Leo und acht Riesen der Spektralklassen F5—G5. Von EDDINGTONS Bestimmungen weicht ihre Skala nur um etwa 0,1 Größenklassen ab. Sie erhalten dann den Klammerausdruck $(W I^* + \Delta m_r^*) = +0,9$. Bei der Unsicherheit in der Bestimmung von Δm_r kann die nach dieser

¹ Ap J 68 S 279 (1928)

² Smithsonian Phys Tables 1921, S 413

Formel aus m , abgeleitete bolometrische Helligkeit naturgemäß nur als ein angenäherter Wert angesehen werden

b) Selektive Strahlungsmessungen im Infraroten

4 Die Anwendung der Selenzellen Handelt es sich darum, selektive Strahlungsmessungen hoher Genauigkeit durchzuführen, so sind die lichtelektrischen Methoden¹ allen anderen Methoden weit überlegen. Abgesehen von den in Ziff 5 angeführten Photozellen wird durchweg im kurzwelligen Spektralbereich gearbeitet. Das Maximum der Empfindlichkeit der in Babelsberg vorwiegend verwendeten Kalium-Aragon-Zellen liegt bei λ 4400, das der Na-Zelle etwa bei λ 4200, das der Rubidiumzellen etwa bei λ 4800. Durch P. GUTHNICK² und H. ROSENBERG³ ungefähr gleichzeitig der Astrophysik dienstbar gemacht, haben die Alkalizellen im Laufe der Jahre in Neubabelsberg und neuerdings auch auf einigen amerikanischen Sternwarten ein außerordentlich aufschlußreiches und zuverlässiges Material geliefert. In jüngster Zeit wurden Alkalizellen auch zur Strahlungsmessung von Sternhaufen und Nebeln herangezogen⁴. Mit der Kaliumzelle und Blau- bzw. Gelbfilter sind wichtige Farbenindexbestimmungen vorgenommen worden⁵, die zeigen, daß die Nachteile eines schmalen ausgefilterten Spektralbereiches durch die Vorteile der außerordentlichen Meßgenauigkeit im weitesten Maße übertroffen werden, so daß diese Farbenindizes den photographischen etwa um das Doppelte überlegen sind. Gelingt es, den Untersuchungsbereich noch weiter gegen die langen Wellen hin auszudehnen, so wird man aus der Kombination mehrerer mit lichtelektrischen Methoden in verschiedenen Spektralbereichen gewonnener Strahlungsmessungen wichtige Aufschlüsse über die spektrale Energieverteilung der Sterne bekommen können.

Die Selenzellen ermöglichen, auch mit lichtelektrischen Methoden in das langwellige Spektralgebiet einzudringen, und sind wegen dieser Eigenschaft, die eine Ergänzung der mit den Alkalizellen gewonnenen Ergebnisse gestattet, in neuer Zeit wieder starker beachtet worden. Historisch gesehen, reicht die astrophysikalische Anwendung der Selenzellen weiter zurück. Bereits 1895 veröffentlicht G. M. MINCHIN eine Arbeit „The Electrical Measurement of Star-Light“⁶. Er arbeitete an einem Spiegel mit selbstkonstruierten primären Selenzellen⁷ und untersuchte ein Dutzend Sterne bis herab zu 3^m, darunter auch die Planeten Venus und Jupiter. Später wurde die Selenzelle wohl erst wieder von E. RUHMER mit der nach ihm benannten Konstruktion bei der partiellen Sonnenfinsternis 1902 Mai 31⁸ und der totalen Mondfinsternis 1903 April 11 verwendet⁹. Die Sonnenfinsternis 1905 August 30 brachte Untersuchungen von TH. WULF und J. D. LUCAS¹⁰ in Tortosa. Registrierungen wurden nicht vorgenommen. Dagegen erfolgte eine Registrierung der Sonnenstrahlung mittels einer Ruhmer-Zelle bei derselben Finsternis durch die Hamburger Expedition im Souk-Ahras¹¹. In der Veröffentlichung ist der Intensitätsverlauf in Lux dargestellt. Eine weitere photographische Registrierung von Selenmessungen hat L. ANCEL¹² bei der

¹ Siehe die ausführlichen Darlegungen im Beitrag von H. ROSENBERG, ds. Handb. II/1, Kap. 4.

² A. N. 196, S. 357 (1913). ³ V. J. S. 48, S. 210 (1913).

⁴ J. SILLIBINS, Wash. Nat. Ac. Proc. 19, S. 222 (1933).

⁵ P. GUTHNICK, Berlin-Babelsberg Veröff. 2, H. 3, S. 30 (1918), P. GUTHNICK u. P. HUGELER, A. N. 210, S. 345 (1920), K. P. BOHNINGER, Berlin-Babelsberg Veröff. 3, H. 4 (1923), W. BECKER, ebenda 10, II 3 (1933).

⁶ London R. S. Proc. 58, S. 142 (1895), s. auch ebenda 59, S. 231 (1896).

⁷ Phil. Mag. (5) 31, S. 207 (1891). ⁸ Weltall 3, S. 63 (1902).

⁹ Weltall 3, S. 200 (1903), s. auch Elektrotechn. Z., Dezember 1904.

¹⁰ Phys. Z. 6, S. 838 (1905). ¹¹ Hamburg Astr. Abh. 3, Nr. 1 (1913).

¹² C. R. 155, S. 267 (1912).

Finsteris 1912 April 17 vorgenommen Er verwendete bereits recht empfindliche Zellen, 34×23 mm, mit sehr dünner Selen-schicht Wenige Jahre später gibt E E FOURNIER D'ALBE¹ der Meinung Ausdruck, daß es möglich sein werde, mit Selenzellen Sterne der Großenklasse 17^m zu entdecken

Die bedeutendsten Verbesserungen des Selenphotometers sind jedoch J STEBBINS² zu verdanken 1907 erschien seine erste Veröffentlichung, eine Selenphotometrie des Mondes unter Verwendung von Ruhmer-Zellen, hauptsächlich aber von neuen Giltay-Zellen Die Zeit der maximalen Phase der partiellen Mondfinsternis wurde auf 1^m genau bestimmt Im Gegensatz zu der bei den bereits genannten Versuchen von RUHMER gewählten Dauerbelichtung erfolgten nunmehr Expositionen von 10^s, eine Methode, die sich auch später bewährt hat Beobachtungen außerhalb der Finsternis zeigten die Variation der Totalhelligkeit mit der Phase, wobei die Intensitätsskala an die Normalkerze angeschlossen wurde Die verschiedenen Farbenempfindlichkeiten der Ruhmer- und Giltay-Zellen werden erkannt und im folgenden Jahre näher untersucht³ Den Zellen ist ein charakteristisches Maximum in der Gegend von λ 7000 eigen, bei den Giltay-Zellen findet sich noch ein sekundäres Maximum bei λ 5900 Im übrigen gilt hier ähnlich wie bei den Alkalizellen, daß die selektive Empfindlichkeit bei jedem einzelnen Individuum gesondert untersucht werden muß Die spektrale Empfindlichkeit der Selenzellen läßt sich bei der Herstellung bis zu einem gewissen Grade beeinflussen Diesbezügliche Versuche wurden von F C BROWN und L P SIEG⁴ eingehend diskutiert Wie A H PFUND⁵ in einer wenig beachteten Notiz hervorhebt, sind die von STEBBINS und BROWN gegebenen Kurven keine absoluten Empfindlichkeitskurven, da die Energieverteilung der Lichtquelle (Sonne) dabei nicht berücksichtigt worden ist Er bemerkt auch gegenüber STEBBINS, man dürfe selenphotometrische Ergebnisse nicht ohne weiteres mit visuellen vergleichen, da die effektiven Wellenlangen verschieden seien Dies ist natürlich richtig, doch liegt gerade in der Verschiedenheit des Empfindlichkeitsmaximums der Wert der neuen Methode, ein Umstand, der 1918 wohl noch nicht klar zu erfassen war PFUND erwähnt noch nebenbei, daß es nicht schwierig sei, Selenzellen zu verwenden, deren effektive Empfängerfläche bis auf weniger als 1 mm² herabgesetzt werde Es sei dann möglich, diese Fläche durch extrafokale Sternbilder zu erfassen, wodurch in Verbindung mit einem hochempfindlichen Galvanometer gute Ergebnisse erwartet werden können Der Gedankengang von PFUND war richtig und wurde durch die 1930 von W E BERNHEIMER⁶ veröffentlichten Versuchsergebnisse bestätigt Bei den STEBBINSschen Untersuchungen von 1910, die als die klassischen astrophysikalischen Selenarbeiten zu bezeichnen sind, wird aber noch mit Selenzellen großer Flächen gearbeitet Die STEBBINSsche Anordnung verwendet eine Giltaysche Drahtzelle von 18×26 mm Fläche, das extrafokale Sternbild hat einen Durchmesser von 7 mm Wegen der starken Temperaturabhängigkeit wurde der an einen 12-Zoller montierte Empfänger in Eis gepackt

Mit einem empfindlichen Galvanometer (1 mm Ausschlag auf einer Skala in 1 m Entfernung = $2,4 \cdot 10^{-10}$ Amp) gelang es dann, Sterne bis 3^{m,5} zu erfassen Veröffentlicht wurden Beobachtungen des HALLEYSchen Kometen⁷ und der Lichtschwankungen des Algol⁸ Bei letzterer Untersuchung konnte das sekundäre Minimum aufgedeckt werden Versuche mit einem Selenphotometer sind erst

¹ The Illuminating Engineer 10 S 115 (1917) ² Ap J 26, S 326 (1907)

³ J STEBBINS, The Colour-Sensibility of Selenium Cells Ap J 27, S 183 (1908)

⁴ Phys Rev (2) 4, S 48 (1914) ⁵ Ap J 28, S 83 (1908)

⁶ V J S 65, S 255 (1930) ⁷ Ap J 32, S 179 (1910)

⁸ Ap J 32, S 185 (1910)

neuerdings wieder von W E BERNHEIMER¹ aufgenommen worden. An Stelle der Giltayschen Drahtzelle wurde mit einer Thüringschen Kondensatorzelle mit kreisförmiger Selenfläche von 1 mm Durchmesser bei einem extrafokalen Sternbilde von 0,6 mm Durchmesser gearbeitet. Diese Anordnung brachte gegenüber der SIEBBINSSCHEN Apparatur einen wesentlichen Gewinn mit sich. So konnten 1930 Juli noch Sterne 7^m,8 erfaßt werden. Durch Verwendung einer zweiten Zelle, die in der Bruckenschaltung als Kompensationszelle diente, war es möglich, auf Eispackungen zur Konstanthaltung der Temperatur zu verzichten. Bei Untersuchungen des Lichtwechsels des Cepheiden η Aql, die BERNHEIMER mit dieser Apparatur vorgenommen hat², gelang der Nachweis eines ungewöhnlichen Lichtausbruches, der zeitlich mit dem Einsetzen der sekundären Welle in der Lichtkurve dieses Veränderlichen zusammenfiel.

Die verwendete Kondensatorzelle besitzt ähnlich wie die Giltayzelle ein ausgeprägtes Maximum λ 7100, die Empfindlichkeit reicht jedoch, wie aus Abb 1 hervorgeht, noch wesentlich weiter in das langwellige Gebiet hinein. Auch diese Kurve kann wegen Nichtberücksichtigung der Energieverteilung im Spektrum der verwendeten Lichtquelle nicht als absolut bezeichnet werden. Sie zeigt jedoch in deutlicher Weise das spektrale Verhalten der Selenzelle relativ zum Thermoelement (s. Ziff 30 und 40), wofür letzteres die Integralstrahlung bis in das äußere Infrarot zu messen gestattet.

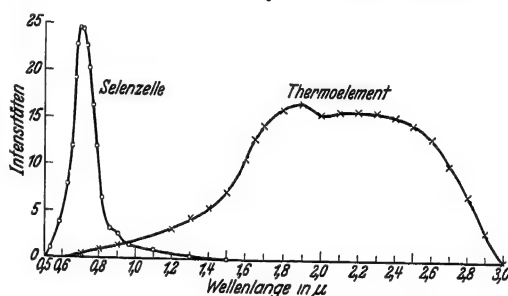


Abb 1 Vergleichung der spektralen Empfindlichkeitsverteilung bei Selenzelle und Thermoelement

Es wäre für die weitere Entwicklung der Energiemessungen in den Sternspektren von Bedeutung, wenn es in Zukunft gelänge, neben den von Kaliumzelle und Selenzelle zu messenden Spektralgebieten noch einen dritten weit im Infrarot gelegenen Bereich mit gleicher Genauigkeit lichtelektrisch zu erfassen. Dies ist nicht unmöglich, wenn auch bisher das dafür in jeder Hinsicht geeignete Material noch nicht gefunden ist. Nach G P BARNARD³ kennt man jedenfalls noch 19 Substanzen, die ähnlich wirken wie Se, jedoch Maxima aufweisen, die wesentlich weiter im langwelligeren Gebiete liegen. So haben Thalofidzellen⁴ (Thalliumoxysulfid) einen ähnlichen Dunkelwiderstand wie Selenzellen. Die genannte Substanz wird auf eine Quarzplatte aufgeschmolzen und in ein evakuiertes Rohr aus Kupfer-Rubinglas eingesetzt. Die Versuche ergaben, daß die Empfindlichkeit bis λ 12000 reicht, das Hauptmaximum lag bei λ 10000, ein sekundäres Maximum bei λ 8500. Eine starke Empfindlichkeitszunahme, insbesondere im kurzwelligen Bereiche, ist bei abnehmender Temperatur festzustellen.

Bi_2S_3 -Zellen sind im visuellen Gebiete allem Anschein nach sogar noch empfindlicher als Selenzellen, bei Abkühlung auf -166° zeigten sich zwei Maxima bei λ 6400 und λ 10000. Ag_2S -Zellen weisen ein Empfindlichkeitsmaximum bei λ 13500 auf, MoS_2 -Zellen bei λ 7000, 8500, 10200 und selbst noch bei λ 18000. Astrophysikalische Anwendungen all dieser genannten Zellen sind bisher noch

¹ V J S 65, S 255 (1930), Forsch u Fortschr 7, S 83 (1931), Lund Medd II, Nr 61 (1931)

² Lund Medd II, Nr 61 (1931)

³ The Selenium Cell London 1930

⁴ I W CASE, Phys Rev 15, S 289 (1920)

nicht bekanntgeworden, dagegen liegen neuerdings Versuche mit Casium-Photozellen vor, die im Infrarot eine große Empfindlichkeit besitzen

5 Versuche mit Photozellen im Infraroten In jüngster Zeit hat J S HALL¹ auf dem Yale-Observatorium Versuche angestellt, um mit Hilfe von Alkalizellen in das langwellige Spektralgebiet vorzudringen. Wie u a R SEWIG² gezeigt hat, reicht von den bisher verwendeten Photozellen die Casiumzelle noch am weitesten in das rote Spektralgebiet hinein. HALL verwendet nun Zellen, die von den Bell-Telephon-Laboratories nach einer Konstruktion von C H PRESCOTT herausgebracht wurden und als „Casiumoxyd-auf-Silber-Photozellen“ bezeichnet werden. Nach den Angaben von HALL besitzen sie ihre Maximalempfindlichkeit bei $\lambda 8000$. Nähere Angaben über die Konstruktion sind in Aussicht gestellt, bisher aber noch nicht veröffentlicht worden. Die neuen Zellen zeigten die unwillkommene Erscheinung, daß auch ohne Belichtung der Kathode Photostrome auftreten. Nach Laboratoriumsuntersuchungen von KOLLER³ und neueren Versuchen von KINGSBURY und STILWELL⁴ ist dieser Dunkelstrom sowohl von der Temperatur als auch von der angelegten Spannung abhängig. Er läßt sich nach den Erfahrungen von HALL durch Abkühlung der Zellen auf -10° bis auf $3 \cdot 10^{-11}$ Amp herabsetzen. Für erfolgversprechende astronomische Arbeiten ist dieser Betrag natürlich noch immer um einige Zehnerpotenzen zu groß. In ähnlicher Weise wie bei den älteren Selenarbeiten (s. Ziff 4) wurde mit einer Kühlung vorgegangen, und zwar die Temperatur durch CO_2 -Schnee bis auf etwa -40° herabgesetzt. Es ist so gelungen, den Dunkelstrom unter $5 \cdot 10^{-14}$ Amp zu bringen, ja bei der zuletzt verwendeten Zelle soll er nicht einmal mehr $5 \cdot 10^{-16}$ Amp erreicht haben. Nach Göttinger Versuchen⁵, von F LOHLE vorgenommen, leiden aber diese Zellen offenbar durch einen derartigen Abkühlungsprozeß. Die HALLsche Zelle ist in einem Dewargefaß montiert. Als Exsikkator wird, wie vielfach üblich, Phosphorpentoxyd verwendet. Bei den Arbeiten am 15 zölligen Loomis-zolostaten wurden gleiche Ausschläge für einen A0-Stern der Größe 4^m und einen K0-Stern der Größe 5^m erzielt. Für die Sterne des Bereiches von $3^m,0$ bis $6^m,5$ ließ sich eine angenäherte Proportionalität zwischen Helligkeit und Photostrom feststellen. Nach einem kurzen Bericht auf dem Meeting der Amer Ast Soc 1932, Dezember⁶, sind inzwischen größere Beobachtungsreihen erhalten worden. Der w F einer Yale-Helligkeit wird zu $\pm 0^m,012$ angegeben. Inwieweit sich die HALLschen Photozellen für die Erforschung der Infrarotstrahlung der Gestirne eignen, kann erst nach dem Vorliegen der einzelnen Ergebnisse entschieden werden. Den bereits genannten Versuchen von F LOHLE zufolge durften aber derartige Photozellen für astrophysikalische Untersuchungen größter Genauigkeit nicht genügende Stabilität besitzen.

6 Die Erschließung des langwelligen Spektralbereiches mittels der photographischen Platte Das langwellige Spektralgebiet, das lange Zeit hindurch nur durch Selenphotometer, Radiometer und die thermoelektrischen Meßmethoden erfaßt werden konnte, wird in den letzten Jahren nun allmählich auch durch photographische Hilfsmittel der Beobachtung zugänglich gemacht.

Die Entwicklung begann wohl mit den Untersuchungen der Hochster Farbwerte, woselbst durch E KONIG und B HOMOLKA wichtige Rotsensibilisatoren entdeckt wurden. Es handelt sich hier um die Farbstoffe Pinazyanol und Dizyanin, durch die die Maximalempfindlichkeit sensibilisierter Platten gegen den langwelligen Spektralbereich hin ausgedehnt werden konnte. Im ersten Fall liegen

¹ Wash Nat Ac Proc 18, S 365 (1932)

² Z f Phys 76, S 91 (1932)

³ Phys Rev 37, S 1549 (1931)

⁴ Publ A A S 7, S 147 (1933)

⁵ Phys Rev 33, S 1082 (1929)

⁶ Z f Astrophys 6, S 293 (1933)

die Empfindlichkeitsmaxima bei λ 6400, im zweiten bei λ 6900. Eine der ersten astronomischen Anwendungen stammt wohl von R W WOOD¹. Er berichtet, 1916 auf der Mt Wilson Sternwarte u. a. auch infrarote Jupiter- und Saturnaufnahmen erhalten zu haben, die mit panchromatischen Spezial-Platten und einem von der Eastman-Kodak-Gesellschaft gelieferten Gelatinefilter (Durchlässigkeit über λ 7000) vorgenommen wurden. Nähere Angaben, insbesondere über Sensibilisierung der Platten, liegen nicht vor.

Ein wesentlicher technischer Fortschritt findet sich in einer Arbeit von G. SCHLIEB², die einen Farbstoff beschreibt, mit dem eine noch weiter in das infrarote Gebiet hineinreichende Sensibilisierung photographischer Platten möglich sei. Als Empfindlichkeitsmaximum wird λ 7110 angegeben, es scheinen jedoch

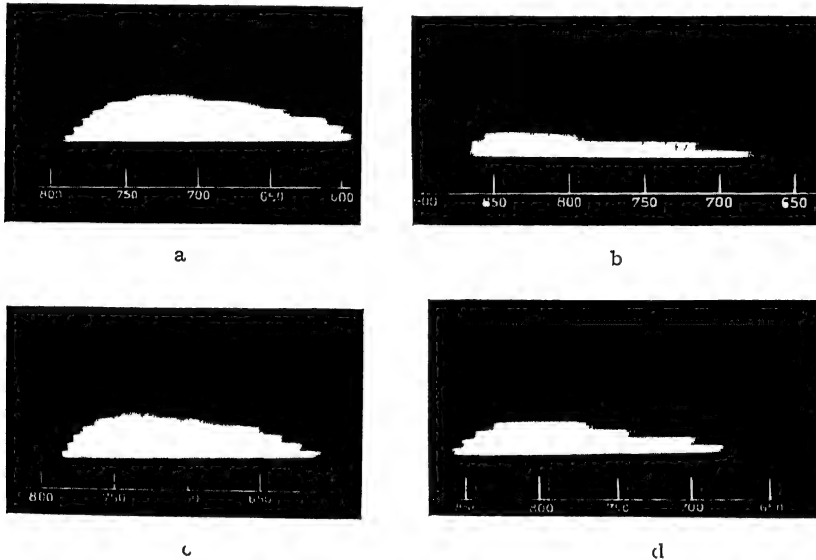


Abb 2 Die spektrale Empfindlichkeit infrarotsensibilisierter Platten, aufgenommen durch Agfa-Rotfilter Nr 42. Folgende Sensibilisatoren sind angewendet: a) Rubrozyanin, b) Allozyanin, c) Agfa Farbstoff 730, d) Agfa-Farbstoff 810. Die Belichtungszeit ist bei a, c und d dieselbe, bei b zehnmal so groß. [Veröff d wiss Zentr Lab d I G. Traub A. G. 1 (1930)]

mit diesem Sensibilisator keine nennenswerten praktischen Erprobungen angestellt worden zu sein. 1920 folgte der von der Eastman-Kodak-Gesellschaft herausgebrachte wichtige Farbstoff Kryptozyanin, der E. Q. ADAMS und H. L. HALL³ zu verdanken ist. Rund 300 Å sind damit gewonnen, die größte Empfindlichkeit liegt etwas über λ 7400. Für die von W. H. WRIGHT⁴ 1924 auf der Lick-Sternwarte vorgenommenen bedeutsamen Untersuchungen des Mars im infraroten Lichte wurde von der Eastman-Kodak-Gesellschaft eine spezielle Kryptozyaninplatte mit einem Empfindlichkeitsmaximum bei λ 7600 hergestellt, die in Verbindung mit dem Filter Wratten Nr 7 verwendet wurde. WRIGHT machte schon damals darauf aufmerksam, daß die kraftige Sauerstoffbande A der Erdatmosphäre sich naturgemäß bei Benutzung dieser Platte bemerkbar macht und als unerwünschtes FarbfILTER wirksam wird. Bei den neuen Aufnahmen gelegentlich der Marsopposition 1926⁵ hat W. H. WRIGHT in sechs Spektralbereichen gearbeitet

¹ Ap J 43, S 310 (1916) — Mt Wilson Contr. Nr 113

² Diss Erlangen 1918, S 10

³ J Amer Chem Soc 42, S 2661 (1920)

⁴ Lick Bull 12, S 48 (1924)

⁵ Lick Bull 13, S 50 (1927)

Hier interessieren nur die Rot- und Infrarotaufnahmen. Die ersteren erfolgten mit Eastman-Process-Pinazyanol-Platte (Nr 4407P), Maximalempfindlichkeit bei λ 6500, die anderen wieder mit Eastman-Process-Kryptozyanin-Platte (Nr 4407C), Empfindlichkeitsmaximum bei λ 7600. In beiden Fällen wurde jedoch nicht mehr mit Gelatinefiltern gearbeitet, sondern mit farbigen Seleniumglasfiltern von Chance-Hilger. Im selben Jahre sind auch Eastman-Kryptozyanin-Platten von F E Ross¹ für Infrarotaufnahmen des Mars, 1927 ebenfalls von Ross für Venus-aufnahmen² verwendet worden.

Neben den wichtigen mit Bolometer und Thermosaule vorgenommenen Untersuchungen über die langwellige Koronastrahlung (s. Ziff 22) liegen auch photographische Arbeiten vor, die mit sensibilisierten Platten erfolgt sind. So haben E. PERTTILÄ und S. B. NICHOLSON³ mit Spezialrapid-Panchromatic Platten und Eastmanfilter „F“ den jenseits λ 6100 gelegenen Spektralbereich untersucht, andererseits haben bei derselben Sonnenfinsternis H. D. CURTIS und K. BURNS⁴ mit einem Dizyaninfilm gearbeitet, der eine Untersuchung des Koronaspektrums und des Flashspektrums im Spektralbereiche λ 5800 bis λ 8800 ermöglichte.

Ein dem Kryptozyanin ähnlicher Sensibilisator ist im Jahre 1928 von der I. G. Farben A.-G. unter dem Namen Rubrozyanin in den Handel gebracht worden. Hierher gehört auch die Platte „A. Calzavara“ (1930), die ein Empfindlichkeitsmaximum bei λ 7450 besitzt.

Ein neuer Vorstoß in das infrarote Gebiet ist dann wiederum dem wissenschaftlichen Laboratorium der I. G. Farben A.-G. zu verdanken, das einen Sensibilisator mit einem Maximum bei λ 8100 erzeugte. Dieser Farbstoff wird für die Agfa-Platte „Rapid 810“ verwendet, die ebenso wie die früheren Erzeugnisse der Agfa, Rapid 730 und Hart 730, etwa eine halbjährige Lagerfähigkeit besitzt. Die Platte Nr. 810, die eine gute Empfindlichkeit im Spektralgebiete von λ 7500 bis λ 8500 aufweist, wurde nach Hypersensibilisierung für das Gebiet λ 5900 bis λ 7100 auch bereits für astrophysikalische Untersuchungen herangezogen. R. WILDT und E. MEYER⁵ haben damit das Jupiterspektrum untersucht und hierbei eine neue Bande λ 7700 bis λ 8100 gefunden. Die Fragen der Hypersensibilisierung panchromatischer Platten sind u. a. von R. WILDT behandelt worden⁶. Ein Rezept zur Hypersensibilisierung der Infrarotplatten der Agfa hat kürzlich K. ROSS⁷ gegeben.

Mit der genannten Platte 810 ist jedoch noch nicht das Maximum erreicht, es gelang die Herstellung des Allozyanins (I. G. Farben A.-G. 1929) mit einem Empfindlichkeitsmaximum bei λ 8300. Wie aus Abb. 2 hervorgeht, ist jedoch die allgemeine Empfindlichkeit der mit Allozyanin sensibilisierten Platten geringer als bei der Agfa-Platte „Rapid 810“. Der Allozyaninfarbstoff dürfte wohl im wesentlichen mit dem Sensibilisator Neozyanin übereinstimmen, der bereits 1925 von M. L. DUNDON, A. L. SCHON, R. M. BRIGGS⁸ entdeckt worden ist. Auch diese Autoren geben das Empfindlichkeitsmaximum zu λ 8300 an. Die Neozyaninplatte hat in der Astrophysik z. B. bei den Arbeiten von L. D'AZAMBUJA⁹ Anwendung gefunden, der Chromosphärenaufnahmen im Licht der Linie des ionisierten Kalziums λ 8542 durchgeführt hat. Auch die photographischen Aufnahmen des Sonnenspektrums im Bereiche von λ 10000 bis λ 11000 von H. D. BABCOCK¹⁰ wurden mit Neozyaninsensibilisierung vorgenommen. Schließlich verdanken wir W. ZEH¹¹ die Entdeckung des Agfa-Farbstoffes Nr. 855. Dieser

¹ Ap J 64, S. 243 (1926)

² Ap J 68, S. 57 (1928)

³ Ap J 62, S. 202 (1925)

⁴ Allegheny Publ. 6, S. 95 (1925)

⁵ Gott. Veröff. 1931, H. 19

⁶ Gott. Veröff. 1931, H. 20

⁷ Zeiss Nachr. H. 4, S. 19 (1933)

⁸ J. Opt. Soc. Amer. 12, S. 397 (1926)

⁹ C. R. 187, S. 201 (1928)

¹⁰ Publ. A. S. P. 41, S. 274 (1929)

¹¹ Siehe W. DIETERLE, Phot. Korr. 68, S. 103 (1932)

Sensibilisator ist für eine Spezialinfrarotplatte verwendet worden, bei der das Empfindlichkeitsmaximum bis auf $\lambda 8550$ hinausgeschoben werden konnte. Auch diese neue Platte wurde bereits für astrophysikalische Untersuchungen herangezogen. WILDI¹ berichtet, daß es bei starker Überbelichtung noch möglich war,

das Jupiterspektrum bis zu $\lambda 9500$ photographisch zu erfassen. Ein der Agfa-Infrarotplatte Rapid 855 analoges Erzeugnis ist von der Kodak-Gesellschaft unter der Bezeichnung „P“-Platte herausgebracht und von C. E. MEES² beschrieben worden. Die spektrale Empfindlichkeit (Maximum bei ca. $\lambda 8500$) ist aus Abb. 3a ersichtlich. In einer jüngsten Veröffentlichung³ berichtet MEES u. a. über eine neue Infrarotplatte der Kodak-Gesellschaft, die Platte „R“, die eine besonders hohe Empfindlichkeit im Bereiche von $\lambda 7400$ bis $\lambda 8400$ besitzt. In derselben Veröffentlichung

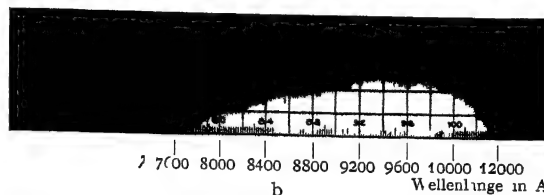
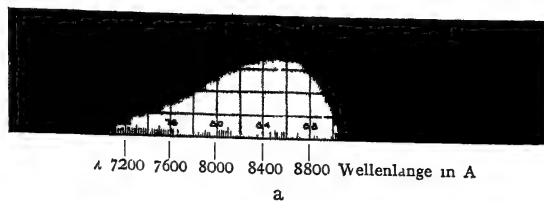


Abb. 3 Die spektrale Empfindlichkeit der Infrarotplatten „P“ und „Q“ der Eastman-Kodak-Gesellschaft (Die Intensitätsskalen der beiden Teile der Abb. sind voneinander unabhängig) [J. Opt. Soc. Amer. 23 (1933)]

finden sich auch einige wenige Angaben über die verbesserte Kodakplatte „Q“, die ebenso wie ein neues Erzeugnis der I. G. Farben A.-G., die Infrarotplatte „Rapid 960“, den letzten und dabei sehr wesentlichen Fortschritt in der Erschließung des infraroten Spektralgebietes darstellt. Die

mit Xenozyanin sensibilisierte Platte „Q“ ist ungefähr bis $\lambda 11000$ empfindlich und erreicht ihr Empfindlichkeitsmaximum bei etwa $\lambda 9800$. Ein Bild der spektralen Empfindlichkeit ist in Abb. 3b wiedergegeben. Die relative Empfindlichkeit der neuen Agfa-Platte „Rapid 960“ sowie die der bereits erwähnten übrigen Infrarotplatten der Agfa, „Rapid 730“, „810“, „855“ kann aus Abb. 4 entnommen werden.

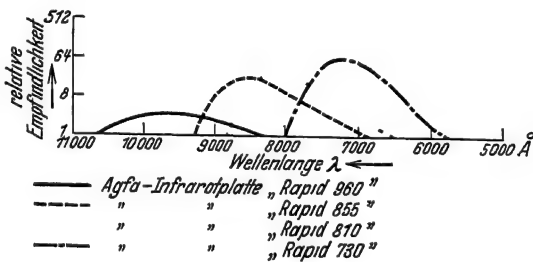


Abb. 4 Die spektrale Empfindlichkeit der Infrarotplatten der Agfa für Nitralicht (Schematische Darstellung) [Z. f. techn. Phys. 14 S. 177 (1933)]

Wie J. EGGER⁵ kürzlich hervor-
gehoben hat, bieten derartige Empfindlichkeitsangaben photographischer Platten, ganz besonders aber der infrarot sensibilisierten, nur ein ungefähres Bild der wahren Verhältnisse. Man muß sich jedoch mit diesen Angaben begnügen, da eine Bestimmung der Empfindlichkeit im absoluten Maße, etwa in der Art, wie sie G. LEIMBACH⁶ vorgenommen hat, bei Infrarotplatten, hauptsächlich

¹ Gott. Veröff. 1932, II 22

² J. Opt. Soc. Amer. 21, S. 753 (1931), 22, S. 204 (1932)

³ J. Opt. Soc. Amer. 23, S. 229 (1933)

⁴ Siehe K. ROSS, Zeiss Nachr. 4, S. 19 (1933)

⁵ Z. f. techn. Phys. 14, S. 177 (1933)

⁶ Z. f. wiss. Photogr. 7, S. 205 (1909)

infolge der Abhängigkeit der Empfindlichkeit vom Alter der sensibilisierten Schichte, auf sehr große Schwierigkeiten stößt

Mit den genannten neuen Platten „Q“ und „Rapid 960“ hat der Vorstoß in das infrarote Gebiet wohl noch nicht sein Ende erreicht, weitere Erfolge sind gewiß zu erwarten. Eine Grenze hierfür ist aber, wie EGGRI¹ darlegt, dadurch gegeben, daß die Empfindlichkeit der infrarot sensibilisierten Schichten mit wachsender Wellenlänge im allgemeinen abnimmt und auch die Haltbarkeit der Platten, je weiter sie gegen das äußerste Infrarot sensibilisiert sind, aus chemischen Gründen allmählich geringer wird. Die theoretische Grenze wäre nach Berechnungen von M. CZERNY² etwa bei λ 20000 (20 μ) erreicht, da in diesem Bereiche wegen dauernder Einwirkung der bei einer mittleren Temperatur bereits sehr fühlbaren Raum- und Körperstrahlung die photographischen Schichten gar bald verschleiern wurden. Die rasche Entwicklung, die in den letzten Jahren die Methoden der Sensibilisierung im Infraroten genommen hat, eröffnen für die Astrophysik ein weites und vielversprechendes Arbeitsfeld. Es ist nicht zu zweifeln, daß die photographischen und photoelektrischen Methoden im langwelligen Spektralbereiche bald so weit vorgeschritten sein werden, daß sie eine wertvolle Ergänzung zu den thermoelektrischen und radiometrischen Gesamtstrahlungsmessungen geben können.

c) Aktinometer und Pyrheliometer zur Messung der Gesamtstrahlung der Sonne

7 Allgemeines Einige Typen sekundärer Meßinstrumente. Zur Messung der Gesamtstrahlung der Sonne sind im Laufe der Jahre zahlreiche Instrumententypen herausgebracht worden, die aber vorwiegend meteorologischen Zwecken dienen. Einige wenige, wie das sekundäre Silver-Disk-Pyrheliometer (Ziff 8), das absolute K. ÅNGSTRÖMSche Kompensationspyrheliometer (Ziff 9) und die absoluten Water-Flow- und Water-Stir-Pyrheliometer der Smithsonian-Institution (Ziff 10), haben jedoch durch ihre Verwendung bei der Bestimmung der Solarkonstante auch astrophysikalische Bedeutung gewonnen. Die sekundären Instrumente dienen nur Relativmessungen, ihre Ergebnisse müssen erst an Standardinstrumenten geeicht werden. Die primären Instrumente liefern Daten in gcal, auf ihre Ergebnisse sind die Standardskalen, wie die K. ÅNGSTRÖMSche und die „Smithsonian 1913 Revised Scale“, aufgebaut.

Es wurde seinerzeit von CROVA vorgeschlagen, die Primärintstrumente als Pyrheliometer bzw. als Pyrheliographen, die Sekundärintstrumente jedoch einheitlich als Aktinometer zu bezeichnen. Demnach sollte z. B. das Silver-Disk-Instrument Aktinometer und nicht Pyrheliometer genannt werden. Da der Vorschlag CROVAS nicht durchgedrungen ist, läßt sich der Charakter der Instrumente aus ihrer Bezeichnung nicht entnehmen. Im übrigen existieren auch sekundäre Instrumente, die nachtraglich in Apparaturen für absolute Messungen umgebaut wurden. Im folgenden sowie in Ziff 8 sollen einige Instrumente hervorgehoben werden, die größere Verbreitung gefunden haben. Bezüglich näherer Einzelheiten der vorwiegend meteorologischen Zwecken dienenden Apparate sei auf einige zusammenfassende Arbeiten (in chronologischer Reihenfolge) hingewiesen.

¹ R. DIETZIUS, Die Hilfsmittel zur Messung der Sonnenstrahlung. Naturwiss. 11 S. 246 (1923).

² K. KAHLER, Meßmethoden der Sonnen- und Himmelsstrahlung. Handb. der biolog. Arbeitsmethoden, Abt. II, Heft 3, S. 379. 1923.

¹ l. c.

² Zf. Elektrotechn. 36, S. 615 (1930).

3 F. M. EXNER, Physik der Sonnen- und Himmelsstrahlung Handb. der Lichttherapie, S. 13 (1927)

4 K. BUTTNER u. F. AIBRECHT Zur Theorie von Aktinometern und Pyranometern I und II, Gerlands Beitr. 22, S. 13 (1929) 26 S. 241 (1930)

Nach K. BUTTNER und F. AIBRECHT⁴ kann man die Meßinstrumente in zwei Gruppen sondern. In die Gruppe I fallen die Apparate, bei denen prinzipiell eine Temperaturmessung des Empfängers selbst vorgenommen wird, also unmittelbare Vergleichsmessungen der Empfängerumgebung fehlen. Hier kann also eine einzige Ablesung nicht genügen, man braucht mehrere Messungen im bestrahlten und unbestrahlten Zustand. Beispiele: MICHELSON-Aktinometer (diese Ziffer), Silber-Disk (Ziff. 8).

Verwendet man hingegen Apparate (Gruppe II), bei denen die Messung in der Bestimmung einer Temperaturdifferenz zwischen Empfänger und Schutzkörper besteht, wie dies z. B. bei den thermoelektrisch arbeitenden Apparaten oder bei dem AIBRECHT'schen Heizbandbolometer der Fall ist (diese Ziffer), so läßt sich die Strahlungsintensität prinzipiell durch einen einzigen Messungsakt feststellen. Bedeutet nämlich $l(E, H)$ die wirksame Wärmeleitung zwischen Empfänger und Schutzmantel, T_E die Temperatur des Empfängers, T_H die an der Innenseite der Schutzhülle herrschende Temperatur, so wird die den Empfänger treffende Strahlung

$$S = l(E, H) [T_E - T_H]$$

Fortlaufende Registrierungen sind eigentlich nur mit derartigen Apparaten sinnvoll. Meteorologische Instrumente dieser Gruppe, die mit Thermoelementen (s. Ziff. 30, 32, 40) arbeiten, sind z. B. das LINKE-Aktinometer², der Pyrheliograph von DORNO-THIENNIUS³ und das vielverwendete Aktinometer von GORCZINSKY⁴. Letzteres besitzt MOIR'sche Thermosaulen (s. Abb. 48—50 und Beschreibung in Ziff. 10) mit Elementen von einigen Mikron Dicke der Kombination Manganin-Konstantan. Eine Variante des Apparates von GORCZINSKY zur Messung der Sonnenstrahlung auf einer horizontalen Fläche, Solarimeter genannt, vereinigt Galvanometer und thermoelektrisches System in einem Universalinstrument. Entsprechend der MOIR'schen Konstruktion kann die ganze Oberfläche der Thermosäule der Sonnenstrahlung ausgesetzt sein, ein Umstand, der hinsichtlich des Randeffektes (s. Ziff. 9) wichtig ist. Die Thermosäule ist hier mit einer Halbkugel aus Flintglas bedeckt und in einem Messingzylinder eingebaut. Der hermetische Abschluß des Gehäuses macht Luftfeuchtigkeit einflußlos.

Schließlich sei noch ein Meßinstrument der zweiten Gruppe angeführt, bei dem die Temperaturdifferenz statt durch Thermoelemente durch eine Bolometeranordnung (s. Ziff. 12 u. 13) gemessen wird. Dieses sog. Heizbandbolometer wurde von F. AIBRECHT⁵ entwickelt, es gestattet, die Messungen in bequemer Weise vorzunehmen, und kann auch prinzipiell als Absolutinstrument dienen. Der sog. Randeffekt ist der Konstruktion nach hier nur in beschränktem Maße zu erwarten. Die Sonnenstrahlung erwärmt ein frei gespanntes, geschwärztes Kupferband, das elektrisch geheizt werden kann, das Heizband ist mit einem dünnen Platindraht leitend verbunden. Eine zweite Kupferlamelle an der Innenwand hängt ebenfalls mit einem Platindraht zusammen, der mit dem ersten Draht in einer Brückenordnung geschaltet ist. Der Ausschlag eines Galvanometers ist proportional der Temperaturdifferenz der beiden Platindrähte, mithin auch der Temperaturdifferenz der beiden Kupferlamellen. Bemerkenswert ist bei dieser Apparatur, daß die Sonnenstrahlung ohne Durchlaufen einer Glas-

¹ Gerlands Beitr. 22, S. 13 (1929)

² Z. techn. Phys. 1924, S. 59

³ Met. Z. 39, S. 303 (1922)

⁴ M. Weather Rev. June 1924, Met. Z. 44, S. 5 (1927)

⁵ Met. Z. 43, S. 195 (1926)

schicht unmittelbar am Empfänger wirksam ist. Hierdurch entfallen die Vorrichtungen zur Elimination störender Absorptionen innerhalb des Instrumentes.

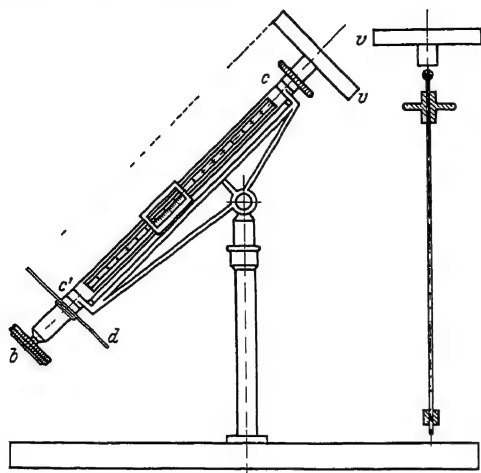


Abb 5 Schematisches Bild der ersten Konstruktion des Pyrheliometers von C. S. POUILLET (E. PRINGSHEIM, Physik der Sonne Leipzig 1910)

Zur ersten Gruppe von Meßinstrumenten gehört, wie erwähnt, das Bimetallaktinometer von W. A. MICHELSON¹, das nur in erschütterungsfreier Aufstellung einigermaßen verlässlich ist. Die Strahlung fällt hier auf eine in einem Metallzylinder ruhende feine geschwarzte bimetallische Lamelle (Platin-Kupfer oder Eisen-Invar), deren eines Ende frei beweglich ist. Die durch die auffallende Strahlung bewirkte Verbiegung der Lamelle wird durch ein Mikroskop mit Okularmikrometer gemessen und gewährt ein Maß für die Strahlungsintensität. Eine wesentlich verbesserte Konstruktion von W. MARIN² ist frei von Temperaturkoeffizienten, die bimetallische Lamelle besteht hier aus Invar-Inkonstantan. L. W. POJAK³ hat in

der Absicht, das MICHELSONsche Aktinometer auch zu absoluten Messungen heranziehen zu können, folgende Abänderung vorgenommen. Die bimetallische Lamelle wird durch einen geschlitzten bimetallischen Streifen ersetzt, der zu Eichzwecken mit einem elektrischen Kompensationsstrom beschickt werden kann⁴. Im übrigen liegt auch eine Neukonstruktion des „Michelson“ durch K. BUIJNER und F. ALBRECHT⁵ vor, bei der der störende Temperaturgang des Nullpunktes beim MICHELSON-Aktinometer durch eine Kompensationslamelle ausgeglichen wird. Durch diese Abänderung ergibt sich demnach hier ein Bimetallaktinometer, das in die zweite Gruppe der Meßinstrumente einzureihen wäre.

8 Das sekundäre Silver-Disk-Pyrheliometer Neben dem Bimetallaktinometer gehört der ersten Gruppe vor allem das sekundäre Silver-Disk-Pyrheliometer an, das bei den Arbeiten des Smithsonian-Observatoriums weitestgehende Anwendung gefunden hat. Es arbeitet nach dem Kalorimeterprinzip, das sich zum ersten Male bei dem klassischen Pyrheliometer von C. S. POUILLET⁶ findet. Die erste Konstruktion von POUILLET aus dem Jahre 1837 ist in Abb 5 wiedergegeben. v ist ein zylindrisches, wassergefülltes Gefäß von 15 cm Höhe und 5 cm Halbmesser, dessen äußerer Deckel aus dünnem, geschwarztem Silberblech besteht. Es enthält die Kugel eines Thermometers, das in die Metallhohle c' eingelassen wird und durch den Knopf b um die eigene Achse gedreht werden kann. Durch die Drehung während der Beobachtung wird das Thermometer gleichmäßig vom Wasser umspült, wodurch ein sicherer Temperaturausgleich gewährleistet ist. Während der Beobachtung ist darauf zu achten, daß das zylindrische Gefäß von der Sonnenstrahlung senkrecht getroffen wird. Bei der einfachen, leicht zu orientierenden Konstruktion ist dies auch bequem zu bewerkstelligen.

¹ Phys Z 9 S 18 (1908) Met Z 25, S 246 (1908)

² Veroff Preuß Met Inst Nr 267, S 15 (1912)

³ Met Z 42, S 196 (1925)

⁴ Siehe auch Z f Instrk 45, S 247 (1925)

⁵ Gerlands Beir 26, S 243 (1930)

⁶ C R 7, S 24 (1828) Pogg Ann 45, S 25 u 481 (1838)

Die von C G ABBOT¹ bei dem „Silver-Disk“ getroffenen Anordnung kann aus Abb 6 entnommen werden. In einem langen, dünnen Rohr befindet sich ein Präzisionsthermometer, das im Bereich von -15° bis $+50^{\circ}$ in Zehntelgrade geteilt ist. Das Thermometer ist geknickt und mündet mit dem Quecksilberbehälter in einem kleinen Silbergefäß *a*, dem eigentlichen Strahlungsempfänger. Zur Herstellung einer guten Wärmeleitung zwischen Silberkapsel und Thermometer ist auch der enge Zwischenraum zwischen beiden mit Quecksilber ausgefüllt. Die silberne Kapsel wird von drei in der Abbildung nicht ersichtlichen Tragrin gehalten und ist zum Schutze gegen Wärmeeinwirkung der Umgebung in ein Kupfergehäuse *G* und dieses wieder in eine Holzwanne *d* eingeschlossen. Die Sonnenstrahlung fällt durch die Blende *k*, die das Holzgehäuse gegen die Strahlung abschirmt, in das Rohr *e* und passiert drei Blenden *f*₁, *f*₂ und *f*₃ mit kreisförmigen Öffnungen. *f*₃ ist die kleinste Blende und hat zudem noch einen geringeren Durchmesser als die silberne Kapsel *a* selbst. An einem mit der Stange *g* verbundenen Handgriff werden die Klappblenden *h* betätigt. Der Beobachtungsvorgang ist sehr einfach. Nach Pointierung auf die Sonne wird die Klappblende geöffnet, 100 Sekunden lang belichtet, abgelesen, Verschuß geschlossen, nach 20 Sekunden wieder abgelesen, Verschuß geöffnet, 100 Sekunden belichtet usw. Die Ablesungen erfolgen auf $\frac{1}{100}^{\circ}$, der wahrschemliche Fehler übersteigt erfahrungsgemäß nicht 0,3%. Das Instrument ist leicht transportabel und in einer einfachen parallaktischen Montierung aufgestellt.

Die mit diesem Instrument gewonnenen Daten werden nicht in Kalorien umgewandelt, sondern dienen ausschließlich als Vergleichswerte verschiedener Stationen. Es sind Strahlungswerte, die der Intensität der Sonnenstrahlung auf der Erdoberfläche proportional angenommen werden können.

Dadurch, daß Beobachtungen bei verschiedenen Luftmassen vorgenommen werden, ergibt sich die Möglichkeit, den Strahlungsverlust in der Erdatmosphäre bis zu einem gewissen Grade zu berücksichtigen. Bei den Bestimmungen der Solarkonstante werden die Pyrehelometermessungen mit den Ergebnissen der spektrobolometrischen Messungen kombiniert (s. Ziff 15 u. 17).

Die Silver Disk-Pyrehelometer, die in gleicher Ausführung an den Beobachtungsstationen der Smithsonian-Institution, aber auch an vielen europäischen Stationen Verwendung gefunden haben, sind im Laufe der Jahre durch kleine

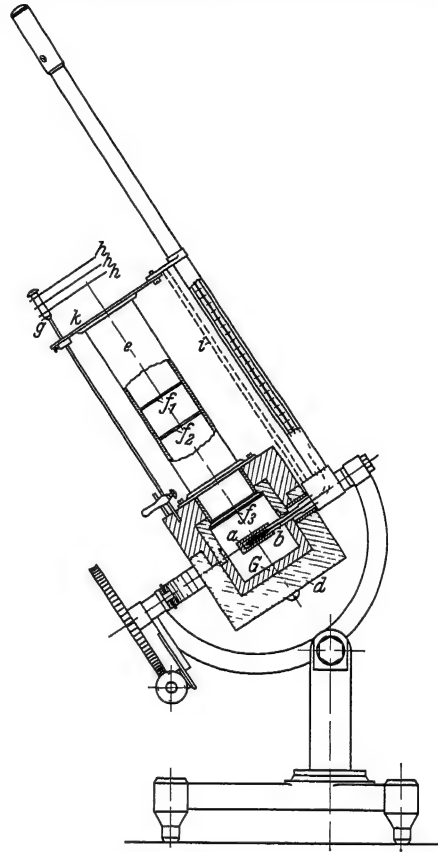


Abb 6 Konstruktionsschema des ersten Silver-Disk-Pyrehelometers von C G ABBOT [Smithson Misc Coll 56 (1911)]

¹ Smithson Misc Coll 56, Nr. 19 (1911), Smithson Ann 3, S. 47 (1913)

Abänderungen immer weiter vervollkommen worden. Der allernueste Typus ist in Ziff 38 beschrieben. Als Sekundarinstrumente müssen die Silver-Disk-Pyrheliometer an absoluten Instrumenten geeicht werden. Dies geschieht mit Hilfe des K. ÅNGSTRÖMSchen Kompensationspyrheliometers (Ziff 9) oder durch Vergleichung mit den Absolutinstrumenten der Smithsonian-Institution, dem Water-Flow- oder Water-Stir-Pyrheliometer (Ziff 10).

9 Das primäre K. ÅNGSTRÖMSche Kompensationspyrheliometer Die wichtigste Aufgabe für die Messung der Gesamtstrahlung der Sonne liegt in der Konstruktion von Standardinstrumenten, deren Messungsergebnisse Absolutwerte zu liefern gestatten und demgemäß zur Eichung der zahlreichen sekundären Instrumente dienen können. Sekundäre Meßinstrumente lassen sich durch die Verwendung eines elektrischen Kompensationsverfahrens prinzipiell in absolute Instrumente umwandeln. Wie in Ziff 7 angedeutet, geschah dies z. B. durch die POLLAKSche Abänderung des MICHELSON-Bimetallaktinometers. Die Verwendung elektrischer Kompensationsmethoden geht auf das Jahr 1893 zurück.¹ Ganz besondere Bedeutung als Standardinstrument hat im Laufe der Zeit das K. ÅNGSTRÖMSche Kompensationspyrheliometer erlangt. Es ist wohl zu unterscheiden von einer früheren Konstruktion K. ÅNGSTRÖMS, dem sog. Differentialpyrheliometer.² Auch dieses Instrument war als Absolutinstrument gedacht, ist aber später nicht mehr verwendet worden. Es besitzt zwei kreisförmige Platten aus massivem Kupfer, die als Kalorimeter dienen. Die Sonnenstrahlung wird abwechselnd der einen und der anderen der geschwarzten Platten zugeführt. Es entsteht jedesmal eine Temperaturdifferenz ΔT , die durch Thermoelemente gemessen und an einem Galvanometer abgelesen wird. Man beobachtet nun die

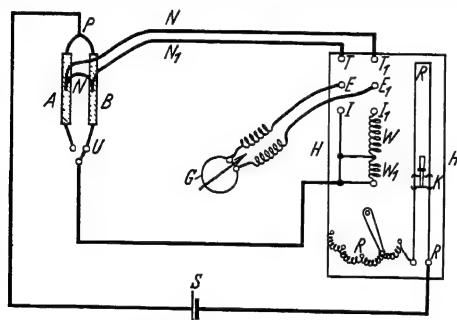


Abb 7 Schaltungsschema des Kompensationspyrheliometers von K. ÅNGSTRÖM
[Nova Acta Reg Soc Sc Upsal (3) 16]

Zeiten t , während deren I das Zeichen wechselt. Ist A die Absorptionsfläche der Kalorimeterplatte, c die Wärmekapazität, so ergibt sich die auffallende Warmemenge zu

$$S = \frac{2 \Delta T c}{A t}$$

Der gewählte Meßvorgang besteht also in einer Zeitbestimmung und in einer Ablesung des Galvanometerausschlages. Das Instrument hat zwei Konstanten, die nur einmal bestimmt werden müssen, die Fläche A der Kalorimeterplatten und ihre Wärmekapazität c .

Das Kompensationspyrheliometer ist, wie erwähnt, im Jahre 1893 entwickelt worden³ und wurde späterhin von K. ÅNGSTRÖM⁴ mehrfach beschrieben. Die wesentlichen Bestandteile und das Schaltungsschema können aus Abb 7 entnommen werden. Den Meßkörper bilden zwei dünne Streifen A und B , ursprünglich aus Platin, später aus Manganinblech⁵, die auf einer Seite geschwarz sind und in einem Ebonitrahmen angebracht werden, der wieder in ein Rohr eingeschoben ist. Die Rückseite der Streifen ist mit Glimmerplättchen belegt,

¹ K. ÅNGSTRÖM, Nova Acta Reg Soc Sc Upsal (3) 16 (1893). Gleichzeitig auch von F. KURLBAUM vorgeschlagen.

² Nova Acta Reg Soc Sc Upsal (3) 13 (1886).

³ Nova Acta Reg Soc Sc Upsal (3) 16 (1893).

⁴ Ap J 9, S 339 (1899), Ann d Phys 67, S 633 (1899), Nova Acta Reg Soc Sc Upsal (3) 20 S 1 (1900).

⁵ W. MARTEN, Veroff Preuß Met Instr 1913, Nr 267.

welche die Lotstellen der Thermoelemente N und N_1 tragen. Auf einem Brett rechts sind ein Kommutator T , E , I , T_1 , E_1 und I_1 , der Rheostat R mit dem Schleifkontakt K sowie die Widerstände W und W_1 befestigt. Belichtet man den einen der Streifen, so wird der elektrische Kompensationsstrom durch den anderen Streifen geschickt und die Stromstärke so lange reguliert, bis wieder dieselbe Temperaturdifferenz thermoelektrisch angezeigt wird. Dann besteht die Annahme, daß die dem Streifen A durch Strahlung zugeführte Warmemenge jener Warmemenge gleich ist, die durch den elektrischen Strom dem Streifen B zugeführt wird. Ist die gemessene Stärke des elektrischen Kompensationsstromes i Ampere, der elektrische Widerstand r Ohm/cm, b die Breite der Streifen in cm, und a das Absorptionsvermögen der geschwarzten Fläche, so beträgt die Warmemenge, die in der Sekunde pro Flächeneinheit erzeugt wird,

$$S = \frac{i^2 r}{b a}$$

Reduziert man auf gcal/min, so erhält man

$$S = \frac{60 i^2 r}{4,19 b a} = k i^2 \text{ gcal min}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

Bei jeder Beobachtung sind zwei Messungen auszuführen, einerseits die Einstellung auf gleiche Temperaturdifferenz, andererseits die Messung der Stromstärke. Zur Festlegung der Konstanten bedarf es einer Bestimmung der Absorptionsfläche und des Leitungswiderstandes des Streifens.

Im Jahre 1905 wurde auf der Innsbrucker¹ und Oxford² Konferenz das K ÄNGSTROM-Pyrheliometer zum Standardinstrument der Sonnenforschung bestimmt. Gegenüber der amerikanischen Skala Smithsonian Revised Scale³ (s. folgende Ziffer) ergaben sich nennenswerte Differenzen, die freilich späterhin allmählich geringer wurden. Sie betrugen 1908 9,2%⁴, 1911 5,5%⁵ und 1913 3,9%⁶. Aus dieser Abnahme geht hervor, daß sich im Laufe der Jahre offenbar die amerikanische Skala verbessert hat. Jedenfalls aber scheint die ÄNGSTROMSche Skala zu tief zu liegen. Die Frage der Ursachen dieser Differenz sind 1914 von ANDERS ÄNGSTROM und 1922 von W. MARIN⁷ eingehend diskutiert worden. A. ÄNGSTROM⁷ weist auf einen Fehler des K ÄNGSTROM-Kompensationspyrheliometers hin, den man als Randeffekt zu bezeichnen pflegt. Während nämlich der Kompensationsstrom naturgemäß einen Streifen in seiner ganzen Ausdehnung durchfließt, wird bei der Bestrahlung des Streifens durch die Sonne das Gebiet der Kanten des Streifens im Schatten bleiben. Auf Grund des damit entstehenden Randeffektes und noch einer zweiten aufgedeckten Fehlerquelle sind nach A. ÄNGSTROM die Ergebnisse mit dem Kompensationspyrheliometer um 1,3% zu korrigieren. Es verbleibt demnach gegen die amerikanische Skala nur mehr eine Diskrepanz von 2,6%. Nun beträgt der Randeffekt beim ÄNGSTROMSchen Pyrheliometer nach einer sorgfältigen Neubearbeitung durch W. MARIN⁸ 2,8%, auf diese Weise wurde sich also eine weitere Annäherung der beiden Skalen ergeben. Die Frage bedarf jedoch noch der endgültigen Klärung, da, wie aus Ziff. 10 und 39 hervorgeht, es heute nicht mehr feststeht, daß die amerikanische Skala absolut richtig ist.

Hinsichtlich des ÄNGSTROMSchen Kompensationsinstrumentes (seit 1906 gilt das in Upsala befindliche Pyrheliometer Nr. 70 als internationales Normal-

¹ Rapport Conf. Met. Int. Paris 1907, S. 13.

² Trans. III Solar Research, Manchester 1, S. 239 (1906).

³ Smithsonian Misc. Coll. 60, Nr. 18 (1913). ⁴ Smithsonian Ann. 2, S. 17 (1908).

⁵ Ap. J. 33, S. 154 (1911). ⁶ Smithsonian Ann. 3, S. 72 (1913).

⁷ Met. Z. 31, S. 369 (1914). ⁸ Met. Z. 39, S. 342 (1922).

instrument) erfolgte 1924 eine sorgfältige Neubestimmung der Instrumentalkonstante k durch E BACKLIN¹ Von großer Wichtigkeit ist die Feststellung desselben Autors in einer zweiten Abhandlung², daß das Kompensationspyrheliometer Nr 70 während der 19 Jahre seit seiner Indienststellung völlig konstant geblieben ist Es ist demnach seit 1906 auch in der ÄNGSTROMSchen Standardskala keine Nullpunktsänderung eingetreten

In der folgenden Ziffer sollen nun die amerikanischen Primarinstrumente behandelt werden, auf denen die Smithsonian-Skala gegründet ist

10 Die Primarinstrumente der Smithsonian-Observatorien Bei den gewöhnlichen Formen der Pyrheliometer ist eine wesentliche Fehlerquelle dadurch gegeben, daß die im Empfänger gemessene Strahlung den Strahlungsanzeiger nicht völlig erreicht, da ein wenn auch geringer Teil der Strahlung wieder durch Konvektion ausgestrahlt wird Dieser zwar geringe Verlust ist rechnerisch schwer zu erfassen, zumal er variabel ist und von verschiedenen Umständen, wie z B Neigungen des Apparates, Windströmungen, wie auch von der Temperaturverteilung im Innern des Apparates abhängt

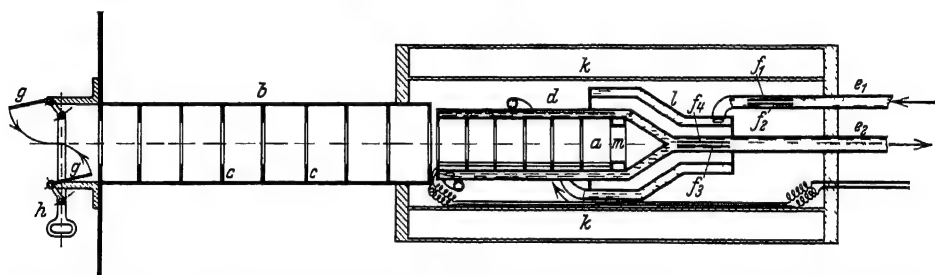


Abb 8 Schematische Skizze des ABBOTSchen Standardpyrheliometers, „Water Flow-Pyrheliometer Nr 1“ [Smithson Ann 2 (1908)]

Das Astrophysikalische Observatorium der Smithsonian-Institution hat diesen Problemen seit 1903 große Aufmerksamkeit geschenkt und nach verschiedenen Vorversuchen ein sog Water-Flow-Pyrheliometer herausgebracht, das als absoluter Strahlungsmesser bezeichnet werden kann und demnach als Standardinstrument zur Eichung der sekundären Pyrheliometer dienen soll Das angestrebte Ziel lag in der Konstruktion eines „schwarzen Körpers“ als Empfänger kammer Weiter sollte die vom Empfänger absorbierte Strahlung nicht direkt gemessen werden, sondern vorerst in einem die Kammer einhüllenden Flüssigkeitsstrom eine Temperaturerhöhung bewirken, welche letztere dann gemessen wird Ursprünglich benutzte man Quecksilber, später Nitrobenzol und schließlich Wasser Die Konstruktion des ersten „Water-Flow-Pyrheliometers Nr 1“³ ist aus Abb 8 ersichtlich Nach Öffnung des Verschlusses g, h fällt die Strahlung in das innen geschwarzte Ansatzrohr b , das zur Ausblendung der Sonnenstrahlung mit mehreren gegen den Empfänger hin immer kleiner werdenden Diaphragmen c versehen ist Das Kalorimetergefäß k enthält im Innern den eigentlichen Meßkörper a , ein zylindrisches geschwarztes Rohr mit konisch sich verjüngendem Ende Zwischen den Wänden des Rohres a und den Wänden d des inneren Mantels fließt Wasser, das bei e_1 in das Kalorimeter eintritt und bei e_2 wieder den äußeren Mantel verläßt Die WHEATSTONEsche Brückenordnung, das elektrische Thermometer zur Messung der Temperaturerhöhung des Wassers, wird von vier Platindrähten f_1, f_2, f_3 und f_4 gebildet

¹ Ark Mat Astr Fys 19a, Nr 10 (1925)

² Ark Mat Astr Fys 19a, Nr 18 (1925)

³ Smithson Ann 2, S 39 (1908)

Wie es sich bald herausstellte, lag in der Anordnung dieser Platindrahte zum Wasserstrom eine Fehlerquelle verborgen. Es wird nämlich bei dieser Konstruktion die Wassertemperatur noch etwas weiter erhöht, nachdem sie bereits durch f_1 und f_2 angezeigt worden ist. Dadurch müssen aber die Meßresultate zu hoch ausfallen. Bei den späteren Konstruktionen Nr 2, 3 und 4 wurde dieser Fehler vermieden. An der mit m bezeichneten Stelle der Abb 8 liegt zur Kontrolle der Meßgenauigkeit eine Drahtspule bekannten Widerstandes, die elektrisch geheizt werden kann. Der resultierende Temperaturanstieg des Wassers wird in diesem Falle in ebensolcher Weise gemessen, als hatte man es mit der Messung der Sonnenstrahlung selbst zu tun. In der Konstruktion liegt hier bereits der erste Ansatz zu der viele Jahre später eingeführten Kompensationsmethode (s Ziff 39). Zu der Apparatur gehören noch komplizierte Anordnungen, die den Wasserfluß in das Kalorimeter regulieren, sowie die Geschwindigkeit des Flusses zu messen gestatten.

Die Water-Flow-Pyreheliometer Nr 2 und 3, die 1907 und 1909 entwickelt wurden¹, sind prinzipiell ähnlich gebaut und unterscheiden sich von der ersten Type durch eine verfeinerte Konstruktion und durch eine bessere Anordnung des die WHEATSTONEsche Brücke bildenden elektrischen Thermometers.

Die Temperaturänderung in der Apparatur, die von der Sonnenstrahlung bzw elektrischen Heizung bewirkt wird, macht sich an den beiden im Ausflußrohr befindlichen Armen der Brücke bemerkbar. Der Widerstand dieser Arme ist nahezu gleich und sei Q , ihr mittlerer Temperaturkoeffizient q genannt. Bezeichnet man ferner den Widerstand des an einem dieser Arme liegenden Shunts, durch den das Brückengleichgewicht erzielt wird, mit e , und die einem Galvanometerausschlag σ entsprechende Änderung des Widerstandes e mit l , so erhält man, wenn schließlich S gleich dem durch Einwirkung der Sonnenstrahlung bewirkten Galvanometerausschlag, a gleich der Öffnung der inneren Blende, die von der Sonnenstrahlung passiert wird, und w gleich der Geschwindigkeit des Wasserflusses ist, für die Sonnenstrahlung R den Ausdruck

$$R = \frac{w S Q}{a \sigma q e} \frac{1}{(Q + e + l) \left(1 + \frac{l}{Q + e}\right)},$$

der von ABBOT zur Reduktion der Messungen verwendet wird.

Zur Kontrolle der mit dem Water-Flow-Pyreheliometer gewonnenen „absoluten“ Skala wurde vom Astrophysikalischen Observatorium der Smithsonian-Institution ein zweites Instrument gebaut, das eine etwas abweichende Wirkungsweise besitzt. Bei diesem Water-Stop-Pyreheliometer² fällt die zu messende Sonnenstrahlung nach Öffnung der Blende C (s Abb 9) in eine unten konisch verlaufende Empfängerammer II , deren Innenwände wie üblich geschwärzt sind. Diese Kammer ruht in einem mit destilliertem Wasser gefüllten Gefaße DD , dem Kalorimeter. Zwischen der Kammer und den Wänden des Gefaßes DD ist ein Widerstandsthermometer F angebracht. Es besteht aus vier Drahten, und zwar zwei Platin- und zwei Manganndrahten, die auf einem isolierten Träger aufgewickelt sind. Die Anordnung enthält noch ein Quecksilberthermometer, das bei E in den Apparat eingeschoben wird. Schließlich besteht die Möglichkeit, in die Absorptionskammer einen elektrischen Strom bekannter Größe einzuführen, dessen Warmewirkung in gleicher Weise wie die Wärmestrahlung der Sonne gemessen wird. Dieser Kompensationsstrom durchfließt den Widerstand G , eine Spule aus Manganndraht, die, wie aus der Abb 9 hervorgeht, in der Kammer AA angebracht ist.

¹ Smithsonian Ann 3, S 52 (1913)

² Smithsonian Ann 3, S 61 (1913)

Das Wasser im Kalorimeter wird nun mittels der motorisch angetriebenen Vorrichtung *BB* in eine rasche Wirbelbewegung versetzt, wodurch die für das sichere Arbeiten der Apparatur notwendige kraftige Durchmischung erreicht wird. Vor Beginn der Beobachtung wird das Widerstandsthermometer *F*, das über einen regulierbaren Widerstand mit einem Galvanometer verbunden ist, durch Veränderung dieses Widerstandes auf einen Gleichgewichtszustand ge-

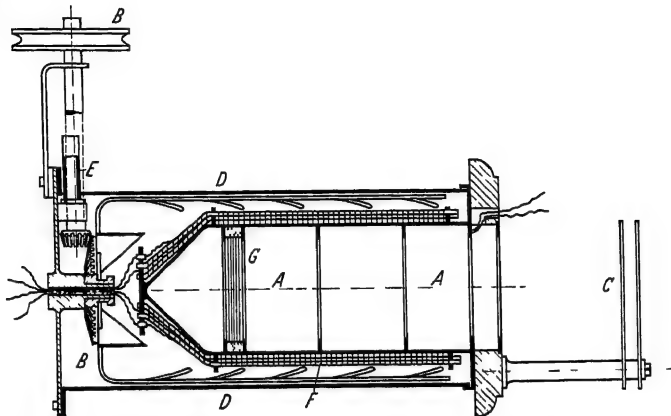


Abb 9 Schematisches Bild des Abbot'schen Standardpyrheliometers, Water-Stir-Pyrheliometer Nr 4'' [Smithson Ann 3 (1913)]

bracht. Innerhalb eines Zeitraumes von 20 Minuten wird der Apparat sodann in geeigneten Intervallen der Sonnenstrahlung ausgesetzt bzw. durch den elektrischen Strom künstlich erwärmt. Am Galvanometer werden die Ausschläge abgelesen, die sich aus den Temperaturänderungen ergeben, und zwar sowohl während der Erwärmung als auch vor und nach der Erwärmung.

Die Reduktion der Skala der Galvanometerausschläge auf eine Temperaturskala erfolgt dadurch, daß man die Temperaturwerte des Quecksilberthermometers *E* mit den Einstellungen des variablen Widerstandes im Augenblick der Ausbalanzierung des Thermometers *F* vergleicht. Die Beziehung zwischen einer Widerstandsänderung *A* und einer Änderung des Galvanometerauschlages *D* läßt sich aus der Formel

$$D = K_1 \frac{A}{e(e + A)}$$

ableiten, wobei *e* den Widerstand, *K*₁ eine Konstante bedeuten. Schließlich ergibt sich die Beziehung zwischen der Widerstandsänderung *A* und der entsprechenden Temperaturänderung *dT* aus dem Ausdruck

$$dT = [K_2 + (e - e_0) K_3] \frac{1}{e(e + A)}$$

Die Konstanten *K*₂, *K*₃ und *e*₀ werden am Tage der Beobachtung ein für allemal ermittelt, die Konstante *K*₁ der ersten Gleichung jedesmal vor und nach jeder einzelnen Beobachtung.

Das Water-Stir-Pyrheliometer wurde in ähnlicher Weise wie das Water-Flow-Pyrheliometer nicht nur zur Vergleichung verschiedener sekundärer Pyrhemeter verwendet, sondern hat auch zur Ableitung der Absolutskala, der sog. Smithsonian-Revised-Scale von 1913 gedient¹. Alle veröffentlichten Werte der Solarkonstante sind auf diese Absolutskala bezogen,

¹ C G ABBOT u. L B ALDRICH Ap J 33 S 125 (1911)

die allgemein auch als zuverlässig angesehen wird. Insbesondere die Untersuchungen von W. MARLEN¹, der die Diskrepanz zwischen der K. ÅNGSTRÖM'schen und der Smithsonian-Revised-Skala auf die Auswirkung eines „Randeffektes“ (s. Ziff 9) beim ÅNGSTRÖM'schen Kompensationspyrheliometer zurückführte, haben das Vertrauen in die Smithsonian-Skala gestärkt. Erst in neuester Zeit beginnt man an der Richtigkeit des Nullpunktes dieser Skala zu zweifeln, insbesondere als 1931 und 1932 neue Absolutinstrumente [s. Abschnitt I], Ziff 39] entwickelt wurden, die hinsichtlich der Vermeidung verschiedener Fehlerquellen den bisherigen Water-Flow- und Water-Stu-Pyrheliometern wesentlich überlegen sind.

d) Bolometer und Spektrobolometer zur Messung der Gesamtstrahlung der Sonne

11 Historische Bemerkungen W. HERSCHEL² stellte bereits 1800 fest, daß bei Bestrahlung eines Thermometers durch die Sonne Wärmeeffekte auftreten, die nicht von der sichtbaren Sonnenstrahlung her rühren können. Er schließt, daß zumindest 50% der Gesamtstrahlung eine Wärmestrahlung sei, die jedoch in keinem direkten Zusammenhang mit der sichtbaren Strahlung stehe, wenn auch offenbar Brechung und Reflexion an Glas nach gleichen Gesetzen vor sich ginge. MACEDONIO MIFLONI war wohl der erste, der in klarer Weise erkannte, daß die Wärmestrahlung von gleicher Natur wie die sichtbare Strahlung sei. Im besonderen mögen folgende Arbeiten dieses Forschers genannt werden: „Observations sur la nouvelle methode thermographique de M^r Herschel et sur son application au spectre solaire“³ und „Sur l'identite des diverses radiations lumineuses calorifiques et chimiques“⁴. In der erstgenannten Arbeit weist MIFLONI auf eine im gleichen Jahre veröffentlichte Untersuchung hin, die JOHN HERSCHEL⁵ mit einem „Prismethermograph“ vorgenommen hat und die deutliche Absorptionen im infraroten Teil des Sonnenspektrums aufdecken konnte. MIFLONI erkannte auch bereits die Bedeutung der Stensalzprismen für die Untersuchungen im langwelligen Spektralbereiche. 1859 wurde von J. MULIER⁶ die Grenze des infraroten Sonnenspektrums bei $1,8\mu$ angegeben. Demselben Autor verdanken wir übrigens eines der ersten Verfahren für die Umwandlung des prismatischen Spektrums in ein Normalspektrum. Einige Jahre später erkennt JOHN TYNDAL⁷, daß gewiß zwei Drittel der Gesamtstrahlung der Sonne von Strahlung aus dem infraroten Gebiete bestritten wird. Demgemäß müsse, so meint er, auch der Maximalwert der Energiekurve im Infrarot gelegen sein. Die Jahre 1871–1883 bringen die ersten Versuche, die spektrale Energieverteilung im Infraroten noch genauer zu erfassen. Diesbezüglich seien hervorgehoben Arbeiten von W. ABNEY⁸ (λ 7150 bis λ 10000), A. E. BECQUEREL⁹ (bis λ 14000) und J. DRAPER¹⁰.

Die erste Anwendung des Spektrobolometers erfolgte 1880 durch S. P. LANGLEY¹¹, drei Jahre später wurde bereits durch E. PRINGSHEIM¹² das Radiometer in die Sonnenphysik eingeführt. Bemerkenswerterweise richten Untersuchungen des infraroten Sonnenspektrums mit Thermoelementen weiter zurück. Es sind dies 1871 und 1872 veröffentlichte Arbeiten von M. S. LAMANSKY, die uns die erste Erkenntnis der großen Absorptionsbanden im Infraroten gebracht haben.

¹ Met. Z. 59, S. 342 (1922)

² Phil. Trans. 90, S. 284 (1800)

³ Ann. Chim. Phys. (2) 71, (1840)

⁴ Ann. Chim. Phys. (3) 15 (1842), (3) 22 (1846)

⁵ Phil. Trans. 130, S. 1 (1840)

⁶ Phil. Mag. (4) 17, S. 233 (1859)

⁷ Phil. Trans. 156, S. 1 (1866)

⁸ Phil. Trans. 171, S. 653 (1880), 177, S. 457 (1886)

⁹ Ann. Chim. Phys. (5) 10, S. 5 (1877), (5) 30, S. 5 (1883)

¹⁰ Phil. Mag. (5) 11, S. 157 (1881)

¹¹ Wash. Proc. Acad. Arts. Sc. 16, S. 342 (1881)

¹² Wied. Ann. 18, S. 32 (1883)

12 Die Apparate von S P LANGLEY und C G ABBOT Ein entscheidender Fortschritt in den Methoden zur Strahlungsmessung der Sonne ist durch die Arbeiten der Smithsonian-Beobachter gegeben. LANGLEY, der die Bedeutung der Thermolemente nicht unterschätzte und dem auch die Arbeiten von BOYS mit dem Radiomikrometer (Ziff 27) bekannt waren, ist von dem einmal gefaßten Plane, die Sonnenuntersuchungen mit Hilfe des Bolometers vorzunehmen, nicht mehr abgegangen. Und tatsächlich ist es ihm und seinem Schuler und Nachfolger C G ABBOT auch gelungen, das Bolometer¹ zu großer Wirksamkeit zu steigern. Die erste Konstruktion stammt aus dem Jahre 1880². Im folgenden Jahr gelingt LANGLEY³ die Beobachtung des Sonnenspektrums bis $\lambda 28000$. 1887 berichtet LANGLEY gemeinsam mit E W VERY⁴ über Untersuchungen mit dem Bolometer am Monde.

Der empfindliche Teil des Bolometers besteht aus dünnen, geschwauzten Platinstreifen, welche die Sonnenstrahlung absorbieren. Diese Streifen bilden zwei Zweige einer Wheatstoneschen Brücke, die derart abgeglichen wird, daß

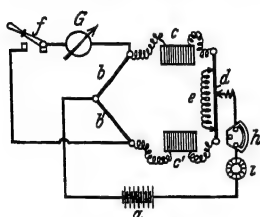


Abb 10 Schematische Skizze der Brückenordnung des LANGLEYschen Bolometers (Konstruktion von 1896) [Smithson Ann 1 (1900)]

ein im Stromkreis eingebautes Galvanometer sich normal in Ruhelage befindet. Wird belichtet, so bewirkt die absorbierte Strahlung eine Temperaturerhöhung der Streifen und demzufolge eine meßbare Störung des Brückengleichgewichtes. Das Schaltungsschema ist in Abb 10 ersichtlich. b und b' sind die Bolometerstreifen, c und c' Spulen aus Manganindraht, die Widerstände der beiden anderen Brückenarme. Die Widerstände e und d dienen zur Feinregulierung des Brückengleichgewichtes, a ist die Spannungsquelle, G das Galvanometer. Die Regulierung der für die Anordnung günstigsten Stromstärke (Größenordnung 0,1 Amp), die am Milliampereometer h abgelesen wird, erfolgt schließlich durch den variablen Widerstand z . Dieser erste Entwurf ist im wesentlichen erhalten geblieben.

Spätere Verbesserungen beziehen sich vor allem auf die Wahl des Materials, luftdichten Abschluß, spezielle Anordnungen der Brücke usw. Neuere Arbeiten über Bolometer haben u a O LUMMER und F KURLBAUM⁵, F PASCHEN⁶ veröffentlicht.

Eine ganz wesentliche Verbesserung wurde neuerdings durch Anwendung von Vakuumbolometern erzielt. Diesbezügliche Konstruktionsangaben sind von WARBURG, LEITHAUSER und JOHANSEN⁷, LEIMBACH⁸, BUCHWALD⁹ veröffentlicht. Das modernste Bolometer von LEIMBACH wurde 1924 beschrieben¹⁰. Hier werden für die Bolometerstreifen glattgewalzte Wollaston-Drahte von 0,003 mm Querschnitt verwendet. Diese Streifen haben dann eine Dicke von 0,00028 mm und eine Breite von 0,025 mm. Die Empfindlichkeit dieses Apparates ist sehr groß. Eine Meterkerze gibt bei einem Meter Skalenabstand einen Ausschlag von 200 cm. Dieses Bolometer scheint für astrophysikalische Zwecke bisher noch nicht verwendet worden zu sein.

Das Vakuumbolometer ABBOTS wurde in seiner ersten Gestalt 1911 konstruiert¹¹ und steht in verbesserter Ausführung bei den Smithsonian-Beobachtern seit 1925 in regelmäßiger Verwendung¹².

¹ Smithson Ann 1, S 47 ff (1900), 2 S 28 ff (1908), 3, S 34 u 42 (1913), 4, S 45 (1922)

² Beschrieben in Wash Proc Acad Arts Sc 16, S 342 (1881)

³ C R 95, S 482 (1882), Wied Ann 19, S 226 u 384 (1883), 22, S 598 (1884)

⁴ Wash Mem 4 S 107 (1887)

⁵ Wied Ann 46, S 204 (1892)

⁷ Wied Ann (4) 24, S 25 (1907)

⁹ Wied Ann (4) 35, S 928 (1910)

¹¹ Smithson Ann 3 S 20 (1913)

⁶ Wied Ann 48, S 275 (1893)

⁸ Wied Ann (4) 33, S 308 (1910)

¹⁰ Ann Phys 28, S 236 (1924)

¹² Smithson Ann 4, S 45 (1920), 5, S 75 (1932)

Bei diesem Bolometertyp ist der Empfänger in einem Glasballon eingeschlossen, der evakuiert wird. Natürlich wurde besondere Sorgfalt auf die Wahl optimaler Dimensionen der Bolometerstreifen gelegt. Es ist schließlich gelungen, wie Vergleichsmessungen unter gleichen Bedingungen ergaben, die Empfindlichkeit gegenüber dem alten Typus um eine Zehnerpotenz zu steigern. Mit empfindlichem Galvanometer lassen sich noch Temperaturänderungen von $1 \cdot 10^{-8}$ Grad feststellen.

Diese Erfolge führten zur Erwägung, mit Hilfe von Vakuumbolometern auch zur Messung der Energieverteilung in den Steinspektren zu schreiten¹. Wie

in Ziff 34 und 35 auseinandergesetzt wird, sind derartige Versuche 1922 auch tatsächlich auf dem Mt. Wilson ausgeführt worden, doch sind die Ergebnisse viel zu ungenau geblieben. Bei den Untersuchungen der Energieverteilung im Sonnenspektrum (Ziff 14) und den Bestimmungen der Solarkonstante (Ziff 15) hat dagegen das Vakuumbolometer in Verbindung mit einem Spektralapparat (Spektrobolometer) bemerkenswerte Ergebnisse gezeitigt.

Die einfachste Form des Spektrobolometers², wie sie von 1893 bis 1896 von den Smithsonian-Beobachtern verwendet wurde, ersieht man aus dem schematischen Bild der Abb 11. Die Strahlung fällt durch den Spalt S auf das Steinsalzprisma P , das nach LANGLEY'S Vorschlag mit einem ebenen Spiegel Sp_1 fest verbunden ist. Ein Konkavspiegel Sp_2 vereinigt sodann die von der Kombination $P - Sp_1$ kommende Strahlung auf den Empfänger des Bolometers B . Die Wu-

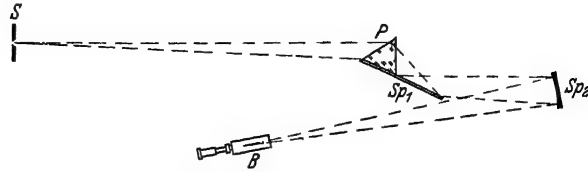


Abb 11 Schematischer Strahlengang im Spektrobolometer das von S P LANGLEY in den Jahren 1893 bis 1896 verwendet wurde [Smithson Ann 1 (1900)]

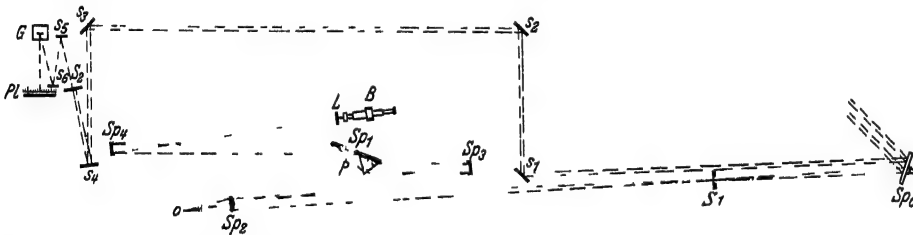


Abb 12 Schematischer Strahlengang im Spektrobolometer nach der Anordnung, die ab 1897 von den Smithsonian-Beobachtern verwendet wurde [Smithson Ann 1 (1900)]

kungsweise der neueren Konstruktion LANGLEY'S³, die ab 1897 in Verwendung trat, ist in Abb 12 schematisch dargestellt. Das Sonnenlicht fällt auf den Spiegel Sp_0 des Siderostaten und wird von hier auf zwei Wegen weitergeleitet. Weg I: Die Strahlung passiert den vertikalen Spalt S_1 und sodann das als Kollimator wirkende Paar zylindrischer Spiegel Sp_2 (konvex) und Sp_3 (konkav). Das parallel gemachte Strahlenbündel fällt auf das Prisma P . Mit diesem Prisma ist wie bei der früheren Anordnung ein ebener Spiegel Sp_1 verbunden. Dieses kombinierte System, das wir auch bei der WU'SING'Schen Konstruktion (s. Abb 13 in Ziff 13) finden, wirft die zu messende Strahlung im Wege des konkaven Spiegels Sp_4 auf den Meßstreifen des Bolometers B . Die kleine Doppelkonvex-Steinsalzlense L ist so justiert, daß die Höhe des Spektrums schließlich mit der Höhe des

¹ Smithson Ann 4, S 59 (1920)

² Smithson Ann 1, S 30 (1900)

³ Smithson Ann 1, S 44 (1900)

Bolometerstreifens übereinstimmt — Weg II Andererseits wird das auf den Siderostaten einfallende Licht vom Spiegel a über vier ebene Hilfsspiegel s_1, s_2, s_3, s_4 auf den Spalt S_2 gelenkt und gelangt sodann über die weiteren ebenen Spiegel s_5 und s_6 bei G zum kleinen Konkavspiegel des Galvanometers Entsprechend den Ausschlägen des Galvanometers kann dann auf der Platte Pl das Bild des Spaltes S_2 abgebildet werden

Bei den Arbeiten mit diesem Instrument waren anfangs nicht weniger als vier Beobachter gleichzeitig tätig Der eine versah am Spektrobolometer die Einstellungen auf die verschiedenen Meßstellungen des Prismas, der zweite vollführte die Ablesungen an der Galvanometerskala, der dritte pointierte den Siderostaten, der vierte schließlich notierte die einzelnen Messungsergebnisse Durch Verbesserung des Apparates und eine Anordnung für automatische Registrierungen wurde es später möglich, mit einem einzigen Beobachter auszukommen Dieses Instrument, Bolograph genannt, ist im Jahre 1894 von LANGLEY zum ersten Male konstruiert worden¹ und steht mit geringfügigen Änderungen noch heute in Verwendung Die Auswertung der Bologramme nach dem von den Smithsonian-Beobachtern geübten Verfahren ist in Ziff 15 bzw 17 dargestellt Ein in mancher Hinsicht dem Spektrobolometer der Smithsonian-Beobachter ähnlicher Apparat ist nach Angaben von J WILSING für Potsdam entworfen worden Die ungemein sorgfältige Konstruktion ist in der folgenden Ziffer an der Hand der schematischen Abb 13 beschrieben, dabei werden auch die wesentlichen Züge der Potsdamer Beobachtungsmethode entwickelt

13 Spektrobolometer und Meßmethode von J WILSING J WILSING in Potsdam hat in Erweiterung seiner Untersuchungen über die Energieverteilung im photographischen und visuellen Spektralgebiet der Sonne² (s. ds. Handb. Beitrag BERNHEIMER, Bd IV, Kap 1, Ziff 14 u 17) auch spektrobolometrische Messungen angestellt, die eine wichtige Ergänzung zu den amerikanischen Arbeiten darstellen Die Ergebnisse sind ähnlich wie bei WILSINGS früheren Untersuchungen an die Energieverteilung im Spektrum eines schwarzen Strahlers angeschlossen Das Bolometer wurde von TOEPFER hergestellt und besteht aus zwei geschwärzten Platinstreifen von 12 mm Länge, $7 \cdot 10^{-1}$ mm Breite und $4 \cdot 10^{-4}$ mm Dicke Diese Streifen bilden zwei Zweige einer Brückenanordnung Die beiden anderen Zweige bestehen aus Manganinduktionspulen hohen Widerstands, die zum Teil im Bolometergehäuse montiert sind, zum Teil auf einem damit verbundenen Schaltbrett ruhen Der Brückenstrom, dessen Intensität der auf einen der beiden Platinstreifen fallenden Energie proportional angenommen werden kann, wird galvanometrisch gemessen Die Anordnung des Bolometers und des Schaltbrettes sind aus Abb 13 zu entnehmen Der Bolometerbehälter besteht aus einem Messingrohr von 9 cm Durchmesser und 10 cm Länge, das zum Strahlungsschutz von einem wassergefüllten Mantel umschlossen ist Zur Justierung des Bolometers dient das auf der Rückseite des Behälters aufgeschraubte kleine Fernrohr

Die Sonnenstrahlung wird von einem Heliostaten durch den Spalt 1 des Spektralapparates auf den Kollimator, einen versilberten Hohlspiegel von 4 cm Öffnung und 40 cm Brennweite, geleitet Die nunmehr parallelen Strahlen treffen auf einen Planspiegel, der in ähnlicher Weise wie bei der Konstruktion von LANGLEY (s. Ziff 12) mit einem 16° -Flintglasprisma derart fest verbunden ist, daß die Strahlen, die schließlich auf den Bolometerstreifen fallen, das Prisma stets im Minimum der Ablenkung passieren Die Einstellung der Kombination Prisma und Planspiegel ist bequem zu bewerkstelligen und wird

¹ Phil Mag (6) 2, S 119 (1901), s. auch Smithsonian Ann 1, S 22 u 69 (1900)

² Potsdam Publ 22, Nr 66 (1913)

mittels eines kleinen Feinrohres an einer Kiciseinteilung abgelesen. Diese Ablesevorrichtung ist in Abb 13 links unten gezeichnet. In den weiteren Strahlen-

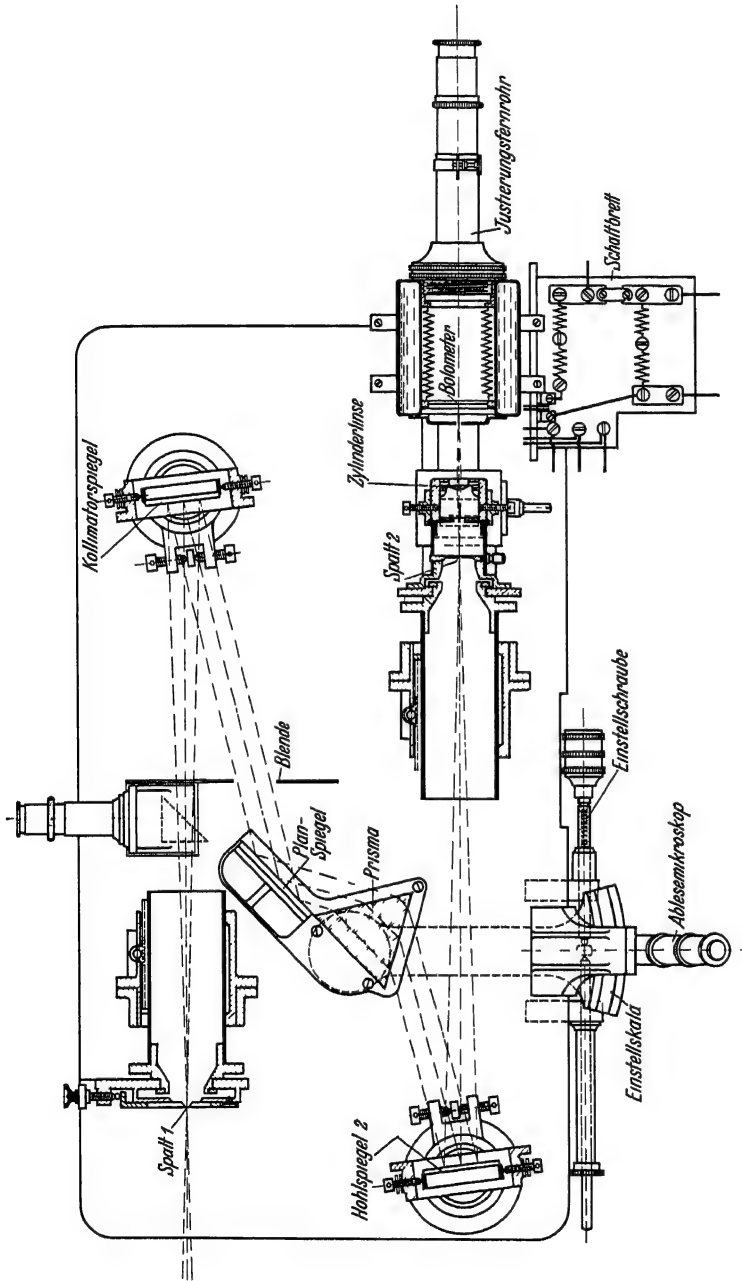


Abb 13 Schematische Darstellung des von J WILSING in Potsdam verwendeten Spektrobolometers (Potsdam Publ Bd 23)

gang ist ein Hohlspiegel eingeführt, dessen Ausmaße mit denen des ersten Spiegels übereinstimmen. Im Brennpunkt des Spiegels befindet sich der Spalt 2. Wie aus der Abbildung ersichtlich, ist zwischen Spalt 2 und dem Bolometer noch eine

plankonvexe Zylinderlinse meßbar zu verschieben. Die Breite von Spalt 2 und die Entfernung der Zylinderlinse und des Bolometerstreifens sind so gewählt, daß das Bild des Spaltes 2 um eine Kleinigkeit schmäler als der Bolometerstreifen selbst ist. Bei den Vergleichsmessungen der Strahlung des schwarzen Körpers hat man, abgesehen von der Entfernung des Heliostaten spiegels, das optische System unverändert gelassen.

Nach Voruntersuchungen über die Dispersion des Prismas und Feststellung der Beziehung zwischen Wellenlänge und Einstellung am Kreissektor des Bolometers wurde die Messung der Sonnenstrahlung an 20 verschiedenen Stellen des Spektrums zwischen λ 4510 und λ 23400 vorgenommen, wobei die ersten neun Stellen (der Bereich unter λ 6000) zur Bestimmung der atmosphärischen Extinktion diente. Für die Auswahl der Meßstellen war maßgebend, daß im Spektrum sich hier keine kräftigen Absorptionslinien und vor allem keine atmosphärischen Absorptionsbanden vorfanden. Zu diesen Meßstellen erster Ordnung kamen gelegentlich noch 15 weitere Meßstellen der Energiekurve zwischen λ 6150 und λ 21120, und schließlich wurden durch relative Anschlüsse noch zahlreiche Zwischenpunkte der Energiekurve festgelegt, die sich auch an Stellen mit Absorption befanden. Das endgültige Verzeichnis enthält 146 Energiewerte im Bereiche von λ 6600 bis λ 23400.

Bei den Messungen sind mehrere Stellen des Spektrums zu Gruppen vereinigt worden, wobei in jeder Gruppe stets auch eine Messung des Galvanometerausschlages bei λ 10260 ($1,026\mu$) vorgenommen wurde. Alle Messungen reduzierte man dann auf diesen Wert, der etwa dem Intensitätsmaximum im prismatischen Spektrum entsprach. Die Messung einer Gruppe einschließlich der Wiederholung in umgekehrter Richtung konnte bei dem Galvanometer von 7,5 Schwingungsdauer in 15 Minuten, bei dem zweiten Galvanometer von 2ⁿ Schwingungsdauer in etwa 7 Minuten erledigt werden.

Sind A_1 und $A_{1,026\mu}$ die beobachteten Ausschläge, so ist es einleuchtend, daß dieses beobachtete Energieverhältnis $A_\lambda/A_{1,026\mu}$ noch mehrfacher Verbesserungen (s. die Darlegungen in Ziff. 1) bedarf, um auf das wahre Energieverhältnis $E_\lambda/E_{1,026\mu}$ überführt werden zu können. Neben der Dispersion des Prismas mit der Wellenlänge ist noch die Änderung der Durchlässigkeit des Bolometers und des Reflexionskoeffizienten des Heliostaten und schließlich die Wirkung der atmosphärischen Absorption zu berücksichtigen. Es ist nämlich

$$\log \frac{L_\lambda}{E_{1,026\mu}} = \log \frac{A_\lambda}{A_{1,026\mu}} - \log c_{\lambda, 1,026\mu} \cdot r_{\lambda, 1,026\mu} - l_z \log \frac{q_\lambda}{q_{1,026\mu}},$$

wobei c und r die genannten instrumentellen Verbesserungen, l_z die beobachtete Luftmasse ($\sec z$) und q den atmosphärischen Transmissionskoeffizienten bedeuten. Die Absorption der Strahlung im Bolometer wurde an einem schwarzen Körper festgestellt, einem Heraeus'schen Laboratoriumsofen, dessen Temperatur wiederum durch eine Thermosaule der Kombination von Platin mit Platin-Rhodium (s. Ziff. 30) direkt gemessen wurde. Die absolute Temperatur dieses schwarzen Körpers betrug 1560° . Sind I_{λ_1} und I_λ die an den Stellen λ_1 und λ_2 des Spektrums des schwarzen Körpers gemessenen Energiemengen und U_{λ_1} und U_{λ_2} die aus dem PLANCK'schen Gesetz berechneten entsprechenden Energiemengen, so gilt offenbar

$$\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} = c_{\lambda_1 \lambda_2} \frac{U_{\lambda_1}}{U_{\lambda_2}}$$

und

$$c_{\lambda_2 \lambda_1} = \frac{p_\lambda}{p_{\lambda_1}} \frac{\frac{\delta_{\lambda_2}}{\delta_\nu}}{\frac{\delta_{\lambda_1}}{\delta_\nu}},$$

wobei p_{λ_1} und p_{λ} die Transmissionskoeffizienten des Bolometers und $\delta_{\lambda_1}/\delta_{\nu}$ bzw. $\delta_{\lambda}/\delta_{\nu}$ die von der Ablenkung ν abhängigen prismatischen Zerstreuungen darstellen. Setzt man, wie es WILSING getan hat, zur Vereinfachung für U_{λ} die WIENSche Beziehung, so erhält man aus den bei der Temperatur T gewonnenen Ausschlägen I_{λ_1} und I_{λ} schließlich

$$\log c_{\lambda_1} = \log \frac{I_{\lambda}}{I_{\lambda_1}} + 5 \log \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \frac{14200 \log e}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)$$

Es sei darauf aufmerksam gemacht, daß die Absorption im Bolometer aus der Strahlung des schwarzen Körpers nur im Gebiete λ 6600 bis λ 23 400 ermittelt wurde. Im Gebiete unter λ 6600 berechnet man sie nur aus der seinerzeit photographisch gewonnenen Energiekurve¹. Es ist also, wie schon WILSING betont hat, hier ein Zusammenhang zwischen photographischen und bolometrischen Messungen vorhanden.

Es erlaubt sich noch die Bestimmung der anderen Instrumentalverbesserungen r_{λ_1} , des Verhältnisses der Reflexionskoeffizienten an dem Helio- statenspiegel. Diese Korrektur ermittelte man durch direkte Messungen jener Intensitätsunterschiede, die sich durch Reflexion der Strahlung einer Tantal- bandlampe am Helio statenspiegel ergab. Sind A'_{λ} und A_{λ} die Galvanometer- ausschläge, die sich mit und ohne Verwendung des Helio statenspiegels ergeben, so gilt

$$r_{\lambda_1} = \frac{A_{\lambda_1}}{A_{\lambda}} = \frac{A'_{\lambda_1}}{A'_{\lambda}}$$

Bezeichnet man mit $I_{O_{\lambda_1}}$, $I_{O_{\lambda}}$ nunmehr die im Sonnenspektrum beobachteten Energiewerte, so sind die von Absorption und Reflexion in der Apparatur be- freiten Energiewerte $E_{O_{\lambda_1}}$ und $E_{O_{\lambda}}$ durch folgende Beziehung gegeben

$$\frac{I_{O_{\lambda_1}}}{I_{O_{\lambda}}} = c_{\lambda_1} r_{\lambda_1} \frac{I_{2O_{\lambda_1}}}{I_{2O_{\lambda}}}$$

Um schließlich die gewünschten extraterrestrischen Energiewerte zu erhalten, ist dann nur mehr an die Ergebnisse der Betrag des atmosphärischen Trans- missionskoeffizienten $I_2 q_{\lambda}/q_{\lambda_1}$ anzubringen. Diese atmosphärischen Trans- missionskoeffizienten wurden von WILSING analog dem von den Smithsonian- Beobachtern geübten Voigang (Ziff 15) aus einzelnen Tagesreihen bestimmt, zu Jahresmitteln vereinigt und schließlich in einer für den Beobachtungs-ort gültigen Normalkurve² zusammengestellt. Eine weitere Diskussion des Stah- lungsverlustes in der Erdatmosphäre, wie er sich aus neuerlichen bolometrischen Messungen der Jahre 1917 bis 1918 für Potsdam ergeben hat, ist von J. WILSING 1924 veröffentlicht worden³. Spezielle Ergebnisse der Untersuchungen WILSINGS sind im Beitrag BERNHEIMER (ds. Handb. Bd IV, Kap. 1), die Frage der Extink- tion der Erdatmosphäre im Beitrag SCHOFENBERG (ds. Handb. Bd II/1, Kap. 1) behandelt. Unzweifelhaft liegt die große Bedeutung der Methode WILSINGS in dem vollzogenen Anschluß an eine Strahlungsquelle des Laboratoriums. Bei den Untersuchungen des Astrophysikalischen Observatoriums der Smithsonian- Institution, die in Ziff. 14 und 15 dargelegt werden, sind derartige Vergleichen nicht vorgenommen worden, doch ist es gewiß auch hier auf Grund vieljähriger Erfahrungen und durch immer neue Verbesserungen in den Beobachtungs- und Reduktionsmethoden gelungen, wichtige Ergebnisse zu erzielen.

14 Das Verfahren der Smithsonian-Beobachter zur Bestimmung der Energieverteilung im Sonnenspektrum Die bei der Bestimmung der Solai-

¹ Potsdam Publ. 22, Nr. 66 (1913)

² Potsdam Publ. 23, Nr. 72, S. 88 (1917)

³ Potsdam Publ. 25, Nr. 80 (1924)

des Hauptspektroskops umgekehrt proportional und dient somit zur Ableitung des Strahlungsverlustes im Instrumente

Unter Berücksichtigung der so gefundenen instrumentellen Korrekturen und der Korrektur für die atmosphärische Absorption erhält man die prismatische Energieverteilung im Sonnenspektrum außerhalb der Atmosphäre. Die Methode ist also wesentlich primitiver als das in der vorhergehenden Ziffer dargestellte Verfahren von WILSING. Die Umwandlung auf die Normalkurve (mit Wellenlängen als Abszissen) erfolgt nach einem graphischen Verfahren. Mit λ als Abszisse und der prismatischen Abweichung θ als Ordinate wird ein Diagramm gezeichnet und sodann für zahlreiche Werte der Wellenlänge die Tangente an die Kurve, $d\theta/d\lambda$, abgeleitet. Damit sind die Umwandlungsfaktoren gegeben. Die endgültige Normalkurve ist jedoch nicht ganz gesichert, vor allem deshalb, weil ja die Schwankungen der Luftdurchsichtigkeit während der Zeit, die zur Ableitung der Instrumentalabsorption benötigt wird, nicht berücksichtigt sind.

Erst 1923¹ ist man sich darüber klar geworden, daß die oben angedeutete Methode zur Ermittlung des Strahlungsverlustes im Spektralapparate die selektive Absorption im Bolometer nicht berücksichtigt. Gesezt den Fall, die Absorption

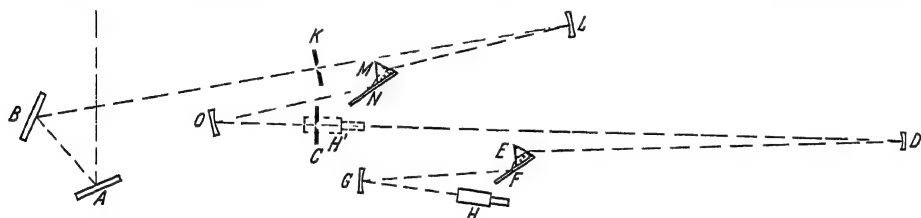


Abb 15 Die Berücksichtigung der Absorption im Spektralapparat bei der Bestimmung der Energiekurve der Sonne. Die Anordnung bei den Arbeiten der Smithsonian-Beobachter. [Smithson Ann 2 (1908)]

im Bolometer sei im kurzwelligen Gebiete geringer als im Infraroten, so wurde durch dieses Verhalten auch die Form der Energiekurve verfälscht werden. ABBOT, FOWLE und ANDRICH² glauben jedoch bei der vereinfachten Annahme bleiben zu können, daß die Absorption im Bolometer für den ganzen Bereich, also für λ 3000 bis λ 30000, von derselben Größenordnung sei, und stützen sich auf die Feststellungen anderer Autoren, daß geschwarzte Empfängerflächen 97% der auffallenden Totalstrahlung absorbieren.

Von den Smithsonian-Beobachtern wurden 1903 bis 1910 zahlreiche Bestimmungen der Form der Energiekurve der Sonne vorgenommen, wobei die Methode unverändert blieb, jedoch gewisse Abänderungen hinsichtlich Zoelostaten und Prismenmaterial zu verzeichnen sind. Eine übersichtliche Zusammenstellung der verschiedenen instrumentellen Bedingungen bei all diesen Versuchen hat ABBOT³ 1911 gegeben. Einige dieser Bestimmungen sind wegen nicht-homogener Skala der Galvanometerausschläge unsicher, andere wegen der Verwendung eines Quarzprismas von schlechter Durchlässigkeit⁴ fehlerhaft. Die mittlere Energiekurve aus den Bestimmungen 1903 bis 1910 ist, wie aus Abb 16 hervorgeht, auch nach Ausschluß aller mit Quarzprisma erhaltenen Daten zweifellos nicht verlässlich, immerhin aber noch besser als die in den Jahren 1916 bis 1918 gewonnene Kurve¹. Bedenken gegen die Ergebnisse von 1916 bis 1918,

¹ Smithsonian Misc Coll 74, Nr. 7 (1923)

² Ap J 34, S 280 (1911), Smithsonian Ann 4, S 191 (1913)

³ Siehe die diesbezügliche Bemerkung im Smithsonian Ann 5, S 15 (1932)

⁴ Einzelwerte siehe Smithsonian Ann 4, Tabelle 58, S 203 (1922)

die nach gleicher Methode, aber bei Verwendung von Stellitspiegeln im Zoelostat gewonnen wurden, sind schon bei Publikation des Bandes 4 der Smithsonian Ann 1920 aufgetreten, konnten aber durch ABBOT und seine Mitarbeiter erst 1923 als stichhaltig erkannt werden, als die wichtigen Neubestimmungen der Jahre 1920 und 1922 reduziert vorlagen¹. Die Messungen von 1920 wurden auf dem Mt Wilson vorgenommen², die Methode blieb unverändert, doch gelangten im Zoelostat neue Stellitspiegel zur Anwendung, ferner hat man an 6 Tagen mit größter Sorgfalt die Durchlassigkeit des Spektralapparates (Prismen aus UV-Kronglas im Haupt- und Hilfsspektroskop) sowie an 5 Tagen mit hoher Solarkonstante und an 5 Tagen mit niedriger Solarkonstante die atmosphärische Transmission ermittelt. Die Einzelwerte der Ergebnisse sind in Abb 16 durch

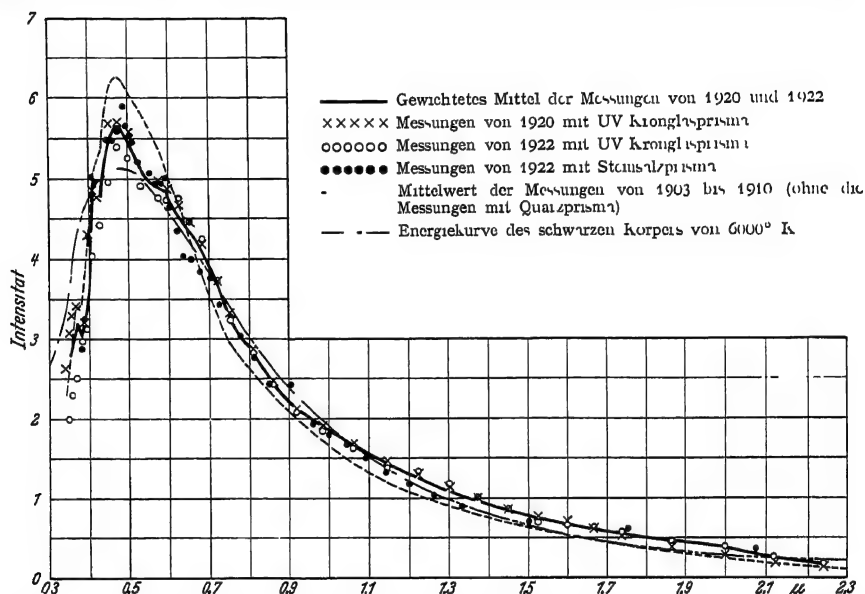


Abb 16 Die neuen Bestimmungen der Energiekurve der Sonne durch die Smithsonian-Beobachter, verglichen mit älteren Daten [Smithson Misc Coll 74 (1923)]

gekennzeichnet. Die letzte und sorgfältigste Neubestimmung erfolgte 1922, ebenfalls auf dem Mt Wilson³. Vor allem wurde versucht, der Verfälschung des ultravioletten Teiles der Energiekurve zu begegnen. Es hatten sich nämlich drei verschiedene Streueffekte gezeigt, von denen einer die Intensität herabsetzte, die zwei anderen sie erhöhten. Man benutzte nun im Hilfsspektroskop neben dem UV-Kronglasprisma vor allem Flintglasprismen und im Hauptspektroskop UV-Kronglas- und Steinsalzprismen. Die neuen UV-Prismen-Intensitäten (o in Abb 16) stimmen mit den UV-Prismen-Werten aus 1920 zwischen λ 5000 und λ 17000 recht gut überein, bei Wellenlängen unter λ 5000 sind die neuen Werte durchweg kleiner, die Differenz beträgt im Mittel 10%, steigt aber bei den kürzesten Wellen bis auf 30% an. Die Messungen mit dem Steinsalzprisma (• in Abb 16) zeigen hingegen im ganzen Bereiche, also auch im kurzwelligen Gebiete, eine sehr gute Übereinstimmung mit den Daten von 1920. Die Abweichungen über λ 17000 sind wohl in erster Linie auf die in diesem Bereiche fortschreitende Abnahme der Durchlassigkeit in den UV-Prismen zurückzuführen.

¹ C G ABBOT, F E FOWLE u L B ALDRICH, Smithson Misc Coll 74, Nr 7 (1923)

² Smithsonian Ann 5, S 12 (1932)

³ Smithsonian Ann 5, S 15 (1932)

Der von den Smithsonian-Beobachtern aus spektralbolometrischen Messungen ermittelte Verlauf der Energiekurve der Sonne ist bis heute wohl am besten durch das gewichtete Mittel der Beobachtungen von 1920 bis 1922 (die ausgezogene Kurve in Abb 16)¹ dargestellt, wie im übrigen auch aus der Vergleichung mit der Energiekurve des schwarzen Körpers (— — — in Abb 16) hervorgeht. Freilich darf nicht übersehen werden, daß die empirische extraterrestrische Energiekurve sowohl im ultravioletten als auch im ultraroten Gebiete noch reichlich unsicher bleibt. Demgemäß treten auch beträchtliche Schwierigkeiten auf, wenn es sich wie bei der Bestimmung der Solarkonstante (s. folgende Ziff 15) darum handelt, die Korrekturen der Bologramme für das nichtbeobachtete ultraviolette Gebiet, also etwa unter λ 3900, und das nichterfaßte infrarote Gebiet, also etwa über λ 24000, rechnerisch zu erfassen. Auch die letzten diesbezüglichen, 1927 veröffentlichten Untersuchungen² (Ziff 15) haben hierin noch keine wesentliche Klärung bringen können.

15 Das Verfahren der Smithsonian-Beobachter zur Ableitung der Solarkonstante nach der „langen Methode“³ Wie in Ziff 14 hervorgehoben, sind erst in neuerer Zeit spektralbolometrische Untersuchungen der Smithsonian-Beobachter ausschließlich zum Zwecke der Ermittlung der extraterrestrischen Energiekurve der Sonne vorgenommen worden. Diese Bestimmungen erfolgten nur an Tagen besonderer Luftdurchsichtigkeit, zugleich wurde auch versucht, mit größter Sorgfalt den Strahlungsverlust in der Apparatur festzulegen. Bei der Bestimmung der Solarkonstante dagegen bilden die spektralbolometrischen Untersuchungen eine Ergänzung zu den pyrheliometrischen Messungen und dienen nur zur Ableitung der atmosphärischen Transmissionskoeffizienten. Hier sind also auch Tage ungünstigeren Luftzustandes herangezogen, und die Instrumentalkonstanten für weniger wichtig erachtet worden. Schon durch die Untersuchungen von LANGLEY im Jahre 1881 war es klar, daß die pyrheliometrischen Messungsergebnisse, wenn sie nach der BOUGUERSchen Formel

$$\log E = m \log a + \log E_0$$

— wobei E die bei der Luftmasse m gemessene, E_0 die extraterrestrische Strahlung, a den Transmissionskoeffizienten der Atmosphäre deuten — auf die Luftmasse $m = 0$ reduziert werden, zu geringe Werte der Solarkonstante ergeben, da die stärkere Absorption im kurzwelligen Gebiete nicht berücksichtigt wurde. Aus dieser Erkenntnis ergibt sich eine modifizierte Methode, die im wesentlichen auch heute noch Verwendung findet. Einerseits wird bei verschiedenem m die Gesamtstrahlung mittels des Pyrheliometers (Ziff 8) in absoluten Einheiten gemessen (P), andererseits aber werden mit Hilfe des Spektrobolometers die Transmissionskoeffizienten der Erdatmosphäre für ausgewählte Wellenlängen bestimmt. Der Arbeitsvorgang setzt sich folgendermaßen zusammen: An einem Tage werden bei verschiedenen Zenitdistanzen im Bereiche von 40° bis 75° vier bis sieben Pyrheliometermessungen und gleichzeitig auch spektralbolometrische Messungen vorgenommen, welche letztere alle auf einer Platte registriert werden. Das in Abb 17 gegebene Beispiel der Montezuma-Station enthält fünf derartige Bologramme übereinander. Die als gestrichelte Linie angedeutete Nullage jeder Kurve wird durch Unterbrechen der Expositionen kontrolliert. Wie man aus der Abbildung erkennt, ist das Spektrum

¹ Die Ordinaten dieser gemittelten Energiekurve im absoluten Maße (Erg pro Quadratcentimeter und Sekunde) hat 1921 M. MINNAERT (B. A. N. 2, S. 75) gegeben. s. auch diesbezüglich das Handb. 4, Kap. 1, Ziff. 10 u. 28, Beitrag BERNHEIMER, und ebenda V/1, Kap. 5, Ziff. 18 u. 21, Beitrag BRILL.

² C. G. ABBOY, Gerlands Beitr. 16, S. 350 (1927).

³ Smithsonian Ann. 2, S. 13 u. 50 (1908), 3, S. 21 u. 39 (1913), 4, S. 323 (1922), 5, S. 103 (1932).

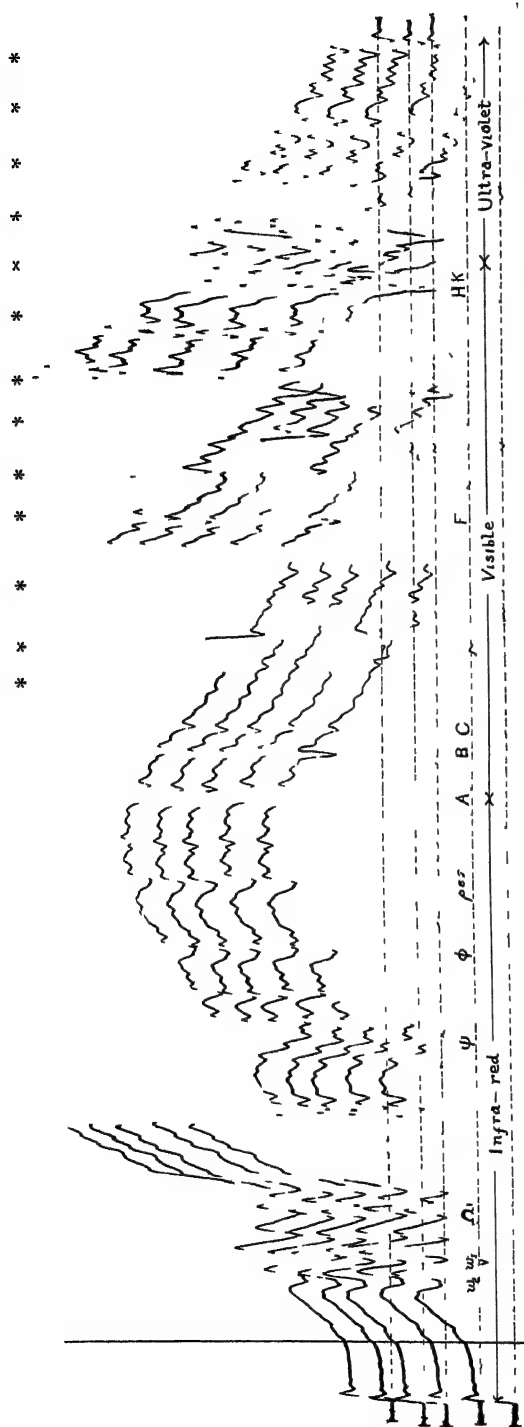


Abb 17 Registrierstreifen des Spektrolometers der Station Montezuma. Gewählt ist ein Tag sehr durchsichtiger Luft. Nichtsdestoweniger ist die Bande $\rho\sigma\tau$ im Gegensatz zu Tagen getrubter Atmosphäre, kaum merklich ist (s. diesbezügliche Ziff 17 u 18). An den mit * bzw. mit weißen senkrechten Strichen angedeuteten Stellen der Abbildung werden die Ordinaten des Bologramms ausgemessen (Smithson Ann 5 (1932)).

zum Zwecke einer übersichtlichen Registrierung auf einer einzigen Platte in einzelne Abschnitte mit Ordinaten derselben Größenordnung zerlegt worden, wobei die notwendige Herabsetzung der Intensität in den drei zentralen Abschnitten mittels dreier verschiedener rotierender Sektoren erzielt wurde. Durch die Spitzen des Bologramms pflegt man nunmehr eine glatte Kurve zu ziehen, wobei die verschiedenen Absorptionsbanden, wie Ω , Ψ , Φ , $\rho\sigma\tau$ usw. vorerst unberücksichtigt bleiben. An etwa 40 in gleichen Abständen voneinander gewählten Stellen der Abszissenachse werden sodann die Höhen der Ordinaten ausgemessen und ihre Summe I , als der Fläche des Bologramms proportional angesehen. Neuerdings¹ bedient man sich eines etwas abgeänderten Verfahrens, das den Vorzug größerer Genauigkeit haben soll. Man wählt nämlich die Meßpunkte direkt aus charakteristischen Stellen der Bolographenkurve, im Beispiel der Abb 17 sind 13 dieser Stellen durch eine weiß gezeichnete Ordinate bzw. durch einen * oberhalb des Registrierstreifens angedeutet. Eine glatte Kurve (ebenfalls weiß gezeichnet) wird jetzt nur mehr zur Überbrückung der Absorptionsbanden im infraroten Gebiete bis etwa zur Bande B gezogen. Die Ablesungen erfolgen in den letzten Jahren an einem speziellen Meßapparat.

¹ Smithson Ann 5, S 96 (1932)

An die gewonnene Flächenzahl I_i sind noch zwei Korrekturen K_r und K_s anzubringen, um I'_i , die Maßzahl für die Sonnenenergie an der Erdoberfläche, zu erhalten. Es gilt

$$I'_i = I_i + K_r - K_s$$

K_r stellt die Beträge der ultravioletten und infraroten Strahlung dar, die bereits außerhalb des vom Spektrobolometer erfaßten Gebietes liegen, das sind die Wellenlängen unter $\lambda 3900$ neuerdings unter $\lambda 3700$, und die Wellenlängen über $\lambda 24000$, neuerdings über $\lambda 25000$. Auf diese Korrektur, deren Wert notgedrungen mehrfach abzuändern war, werden wir im folgenden noch zurückkommen. K_s sind die Flächen der atmosphärischen Absorptionsbanden in den Bologrammen, die naturgemäß von I_i in Abzug zu bringen sind.

Man besitzt also pro Tag 5 bis 7 Werte von I'_i , die der Intensität der Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche für einzelne Luftmassen proportional waren, wenn die Empfindlichkeit des Bolometers und die mittlere Durchlässigkeit der Optik während des ganzen Beobachtungsvorganges konstant geblieben wäre. Diese Bedingung ist, wie in Ziff. 14 bereits auseinandergesetzt, nicht voll erfüllt. Nun verfügt man allerdings dadurch über eine gewisse Kontrollmöglichkeit, daß ja gleichzeitig auch die Messungen P mit dem Pyrheliometer (Silver-Disk, Ziff. 8) vorliegen. Man berechnet da den Wert P/I'_i für jedes Bologramm und korrigiert die Ordinaten durch Multiplikation mit den Differenzen dieser Quotienten vom Tagesmittelwert. Zugleich ergibt die Hebenziehung der Pyrheliometerablesungen die Umwandlung auf eine absolute Skala. Der Quotient P/I'_i stellt die Zahl der Kalorien pro cm^2 und Minute für die Einheit der Bolographenkurve dar.

Eingangs dieser Ziffer haben wir bereits darauf hingewiesen, daß die Intensität außerhalb der Erdatmosphäre mit Hilfe der Transmissionskoeffizienten für ausgewählte Wellenlängen abgeleitet wird. Die Transmissionskoeffizienten werden nun aus dem Zusammenhang zwischen den Logarithmen der Ordinaten in I'_i und den beobachteten Luftmassen m auf graphischem Wege ermittelt. Daß dieser bei der „langen Methode“ zur Bestimmung der Solarkonstante gewählte Extrapolationsvorgang hinreichend genau ist, muß bezweifelt werden, sonst wäre es nicht denkbar, daß H. KNOX-SHAW¹, G. GRANQUIST² und W. E. BERNHARDT³ in Daten verschiedener Zeitepochen Beziehungen zwischen definitiven Werten der Solarkonstante und gleichzeitig beobachteten Transmissionskoeffizienten aufdecken konnten.

Nach Durchführung dieser Extrapolation erhält man also schließlich Ordinaten eines „extraterrestrischen“ Bologramms, deren Summe als Maßzahl der extraterrestrischen Strahlung dient. Auch hier ist diese Maßzahl I_0 wieder um den mutmaßlichen Betrag der vom Spektrobolometer nicht mehr registrierten ultravioletten und infraroten Strahlung K_r zu korrigieren. Man erhält dann

$$I'_0 = I_0 + K_r,$$

und wenn δ_1 die momentane, δ_0 die mittlere Sonnendistanz bedeutet, als Endresultat für die Solarkonstante

$$S = \frac{P}{I'_i} I'_0 \left(\frac{\delta_1}{\delta_0} \right)^2$$

Wie man sieht, sind es, wenn die Instrumentalfehler als streng berücksichtigt gelten, vor allem die Schwierigkeiten, mit denen diese Methode zu kämpfen hat die Unsicherheiten bei der Ermittlung der Transmissionskoeffizienten und die

¹ Helwan Bull. 17 (1915), 23 (1921), 30 (1924)

² Medd. fr. Vet. Akad. Nobelinstit. 5, Nr. 1, (Stockholm 1919)

³ Sechiger-Festschr. 1924, S. 452

Unsicherheiten in der Bestimmung von K_1 und K_2 . Der ultraviolette Anteil von K_2 wurde z B bei den Untersuchungen von 1908 noch wesentlich unterschätzt. Erst die Beobachtungen auf dem Mt Whitney, die sich bis zur Wellenlänge λ 2900 erstreckten, haben eine bessere Bestimmung dieser Korrektur ermöglicht. Sie ergab sich zu 1,58% der Solarkonstante¹. Dieser Betrag wird 1922 von ABBOT² noch immer als unvollkommen angesehen, im übrigen hat schon 1914 E KRON³ dagegen Bedenken geäußert. Die letzte Neubestimmung, die 1927 veröffentlicht wurde, verdanken wir wieder C G ABBOT⁴, sie liefert auf Grund sorgfältiger Berichtigung der Fehlerquellen nun eine mehr als doppelt so hohe Ultraviolett-korrektur, nämlich 3,44% der Solarkonstante.

Die Korrektur für den nichtbeobachteten infraroten Teil wurde lange Zeit hindurch unterschätzt, und zwar beträchtlich mehr, als es bei der UV-Korrektur der Fall war. So rechnete man noch in den Veröffentlichungen von 1922⁵ mit einer Korrektur von 0,55% der Solarkonstante, statt mit 2,0%, einem Ergebnis neuer Messungen von ABBOT und ALDRICH⁶ (s. vorhergehende Ziffer) mit Steinsalzprismen. Die Infrarotkorrektur ist also um 1,45%, die UV-Korrektur um 1,86% der Solarkonstante größer als bisher angenommen. Demnach beträgt die Gesamterhöhung der Korrektur gegenüber den in Smithsonian Ann 4 veröffentlichten Daten 3,31% der Solarkonstante. Wie ABBOT im übrigen bemerkt, ist auch diese neue Korrektur nicht völlig befriedigend. Aus einer 1927 veröffentlichten Bemerkung, die 1932 unverändert abgedruckt wurde, geht jedoch hervor, daß der Fehler in K_2 nicht berücksichtigt werde, da er durch einen der Größenordnung nach gleichen Fehler im entgegengesetzten Sinne kompensiert sei, der sich bei der Reduktion auf die Pyrheliometerskala gezeigt habe. Aus diesem Grunde haben die Smithsonian-Beobachter die Daten der Solarkonstante (s. Tab 3 u 4 in Ziff 20) unverändert gelassen.

Die nennenswerte Unsicherheit, die andererseits bei der Festlegung der Korrektur K_1 (atmosphärische Absorptionsbanden) und bei der Bestimmung der Transmissionskoeffizienten entsteht, kann auch heute noch nicht als überwunden angesehen werden. Man bedient sich hier einer von F E FOWLE⁷ in den Smithsonian Ann 4, Kap 3 entwickelten Methode, die einen im die Praxis geeigneten einfachen Weg der Auswertung der Bologramme weist. Man mißt die Ordinaten des Fußpunktes der größten Einsenkung einer Bande ρ und die entsprechende Ordinate ρ_{00} , die durch die glatte Kurve bestimmt ist. Der Quotient der Ordinaten ρ/ρ_{00} steht nun in einer Beziehung zur Flächenzahl der Bande. Diese Beziehung wird aus zahlreichen empirischen Kurven festgelegt, so daß man schließlich aus bestimmten gemessenen Werten der Ordinatenquotienten die Fläche der betreffenden Bande im Bologramm auf etwa 1% genau erhalten kann. Als besonders charakteristisch wurde ursprünglich die Bande ρ_{07} (siehe Abb 17) angesehen, die im übrigen auch bei der sog. „kurven“ Methode der Solarkonstantenbestimmung eine Rolle spielt. Neuerdings wird vorwiegend die Bande ψ verwendet (s. Methode II, Ziff 18). Wie bereits eingangs dieser Ziffer erwähnt, bringt das FOWLESche Verfahren den atmosphärischen Einfluß in den Solarkonstantenwerten nicht völlig zum Verschwinden. Gewisse Verbesserungen ergeben sich jedoch durch die Heranziehung gleichzeitiger Pyranometermessungen. Der dann gewählte Reduktionsvorgang soll in Ziff 17 dargestellt werden.

¹ Smithsonian Ann 3, S 39 (1913)

² Smithsonian Ann 4, S 164 (1928)

³ V J S 49, S 53 (1914), Ann d Phys (4) 45, S 377 (1914)

⁴ Gerlands Beitr 16, S 344 (1927), Smithsonian Ann 5, S 103 (1932)

⁵ Smithsonian Ann 4, S 131 ff (1922)

⁶ Smithsonian Misc Coll 74, Nr 7 (1923)

⁷ Ap J 37, S 359 (1913), 38, S 392 (1913) s. auch ds Handb II/1, Kap 1, Beiträg

e) Das Pyranometer und seine astrophysikalische Anwendung.

16 Typen des Pyranometers Von den Instrumenten, die zur Messung der Himmelsstrahlung sowie zur Messung der nachtllichen Ausstrahlung dienen, hat das sog Pyranometer auch astrophysikalische Bedeutung gewonnen. Es wird nunmehr auch bei der Bestimmung der Solarkonstante herangezogen, und zwar in Verbindung mit dem Pyrheliometer und Spektrobolometer. Die neue Methode auf die wir noch zurückkommen werden, gestattet, wiederholt an einem Tage vollständige Messungen auszuführen, da für einen Wert der Solarkonstante im Prinzip bereits eine Beobachtung bei einer einzigen Zenitdistanz der Sonne genügt. Ein weiterer Vorteil der Methode besteht darin, daß es auch möglich ist, Tage mit schwankenden Bewölkungsverhältnissen in das Arbeitsprogramm aufnehmen zu können. Die Messungen lassen sich in etwa 15 Minuten, die Rechnungen zur Ableitung der Solarkonstante, die nach den Angaben der Smithsonian-Beobachter bisher etwa 15 Stunden gedauert haben, in etwa 2 Stunden erledigen.

Gegenwartig bestehen zwei Typen von Pyranometern, das ÅNGSTRÖMSCHE und das Smithsonian-Pyranometer, die aber in ihrer Wirkungsweise prinzipiell nur wenig verschieden sind. Das von ANDERS ÅNGSTRÖM entwickelte Pyranometer wurde zuerst im Jahre 1919 beschrieben¹. Später ist das Instrument von A. ÅNGSTRÖM und C. DORNO² in Verbindung mit einem registrierenden Galvanometer auch zur Messung der Totalenergie der Sonne verwendet worden. Im übrigen dient es aber vorwiegend zur Lösung meteorologischer Aufgaben, die in diesem Handbuche übergangen werden können. Die verbesserte Konstruktion von A. ÅNGSTRÖM³ ähnelt dem von ihm seinerzeit gebauten Pygeometer, einem rein meteorologischen Apparat. Wie aus der nebenstehenden Abbildung 18A entnommen werden kann, ruht beim ÅNGSTRÖMSCHEN Pyranometer eine Glocke *g* aus Flintglas hoher Durchlässigkeit auf einer Metallscheibe *d*. Die Empfängerstreifen *abab* sind in der Metallscheibe eingelassen. Die Streifen werden wie üblich geschwärzt, die mit *a* bezeichneten aber dann nachträglich mit einem weißen Farhuberzug versehen. Als Farbstoff verwendet man Magnesiumoxyd, in einer späteren Konstruktion Zinkoxyd. Die Anordnung des schwarzen und weißen Streifens ist in der Skizze C (rechts unten) ersichtlich. An der Rückseite der Streifen befinden sich die Lotstellen eines Thermoelementes, dessen Thermostrom mit einem Galvanometer *G* gemessen wird.

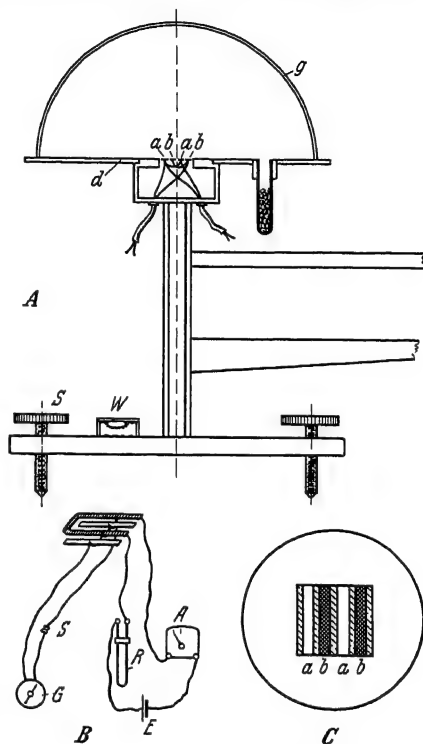


Abb 18 Das Pyranometer von Anders Ångström. Oben (A) schematisches Bild des ganzen Apparates. Links unten (B) Schaltungsdiagramm, rechts unten (C) schematische Anordnung der Empfängerstreifen (im übrigen siehe Text). [Medd Met-Hydrt Anst 4 Stockholm (1928)]

¹ M. Weather Rev. Nov. 1919.

² M. Weather Rev. März 1921.

³ Medd Met-Hydrt Anst Stockholm 1, Nr. 3 (1928).

Die Wirkungsweise der Apparatur ist folgende. Bei der Exposition des Empfängers bewirkt die auftreffende Strahlung im Pyranometer eine Temperaturdifferenz, veranlaßt durch den Umstand, daß die schwarzen Streifen naturgemäß mehr Strahlung absorbieren als die weißen. Das Galvanometer G , das an die Lotstellen angeschlossen ist, zeigt dann einen gewissen Ausschlag. Nun wird den weißen Streifen ein Kompensationsstrom zugeführt und am Schiebewiderstand R so lange reguliert, bis das Galvanometer wieder auf die Nullage einspielt. Die sich ergebende Stromstärke C wird am Milliamperemeter M (s. Abb. 18B) abgelesen. Es ist die zu messende Strahlung

$$R = KC^2,$$

wobei K eine Instrumentalkonstante darstellt.

Das Pyranometer der Smithsonian-Beobachter ist von ABBOT und ALDRICH¹ in zwei Abhandlungen beschrieben worden. Nach mehrfachen Verbesserungen entstand das Pyranometer², das zuerst bei den Solarkonstantenbestimmungen in Calama zur Verwendung gelangte. Der Empfänger besteht hier aus zwei Manganstreifen von 6 mm Länge und 2 mm Breite. Die Dicke des einen Streifens ist jedoch um eine Zehnpotenz größer als die des zweiten, nämlich $3 \cdot 10^{-2}$ mm gegenüber $3 \cdot 10^{-3}$ mm. Dadurch wird ein ähnlicher Effekt erzielt wie bei dem ÅNGSTRÖMSCHEN Pyranometer durch die Wahl von schwarzen und weißen Streifen. Infolge der verschiedenen Dicke bewirkt nämlich die Strahlung, die gleichzeitig beide Streifen trifft, schließlich eine Temperaturdifferenz, die thermoelektrisch gemessen wird. Zwei Thermoelemente der Kombination Tellur-Platin sind in Serie geschaltet an der Rückseite der Streifen angeordnet, deren Thermostrom an einem Galvanometer die auftretende Temperaturdifferenz angibt.

Der Beobachtungsvorgang ist folgender. Der Empfänger wird der Strahlung ausgesetzt, infolge der unterschiedlichen Dicke der beiden Manganstreifen tritt eine gewisse Temperaturdifferenz auf, die sich wieder in einem gewissen Ausschlag auswirkt. Nun wird der Empfänger abgeschirmt. Nach etwa 30 Sekunden wird dann beiden Streifen zugleich ein elektrischer Strom zugeführt und dermaßen abgeglichen, daß durch die elektrische Erwärmung ein ungefähr ebenso großer Ausschlag wie früher erzielt wird. Es ist also die Energie des elektrischen Stromes, bei jeden Streifen in Wärme umgesetzt, dann gleich der Energie der Strahlung, die von jedem Streifen absorbiert wird. Ist C die Stromstärke, A_R der Ausschlag bei Bestrahlung, A_C der durch den Heizstrom bewirkte Ausschlag, so ist die Strahlungsintensität

$$R = K \frac{A_R}{A_C} C^2$$

K ist eine Instrumentalkonstante, bei dem Pyranometer A.P.O. Nr. 6 (versehen mit einer Glasglocke wie in Abb. 18) ist $K = 2,54 \text{ g cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$. Es schien nicht nötig, exakte Kompensation durchzuführen, da die beobachteten Ausschläge erfahrungsgemäß dem Quadrate des Heizstroms streng proportional waren. Wenn die gemessene Strahlung R einen Ausschlag A_2 und ein Strom C_1 einen davon etwas abweichenden Ausschlag A_1 bewirkte, so konnte R durch einen Strom C_2 kompensiert werden, der nur folgender Bedingung genügen mußte

$$\frac{C_1^2}{C_2^2} = \frac{A_1}{A_2},$$

¹ The Pyranometer—an Instrument for Measuring Sky-Radiation, Smithsonian Misc. Coll. 66, Nr. 7 (1916), The Use of the Pyranometer, ibenda 66, Nr. 11 (1916)

² Smithsonian Ann. 4, S. 65 ff. (1922)

Bei den Bestimmungen der Solarkonstante wird das Pyranometer auf einer äquatorialen Montierung, damit die Ebene des Empfängers senkrecht zur einfallenden Sonnenstrahlung zu stehen kommt, befestigt. Das Instrument wird auf 30° Winkelöffnung abgeblendet und außerdem noch durch eine Zentralblende gegen direktes Sonnenlicht abgeschirmt. Pointiert man auf die Sonne, so mißt dann das Pyranometer die Himmelsheelligkeit in einem Kreissegment von etwa 15° bis 30° Winkeldistanz.

Nach den ersten Jahren der Anwendung des Pyranometers ergab sich die Notwendigkeit gewisser Verbesserungen, die hauptsächlich bezweckten, daß die



Abb 19 Teilbild der südafrikanischen Station des Smithsonian-Observatoriums auf dem Berge Brukkaros (1000 m). Der Beobachter bedient (im Bilde rechts) die beiden Pyrhelometer und das auf derselben Montierung angebrachte Pyranometer [Smithson Ann 5 (1932)]

gleichmäßige Bestrahlung aller Stellen der Pyranometerstreifen bei allen Sonnenhöhen gewährleistet bleibt. Bei der letzten Anordnung¹ ruht der Apparat in einem Gehäuse, dessen Inneres gegen den Empfänger hin konisch verläuft und mit vier Blenden von 77, 57, 34 und 16 mm Öffnung versehen ist. Die äußerste Blende gestattet, die Himmelsheelligkeit in einem Winkeldurchmesser von 29° zu messen, die hier angebrachte Zentralblende von 18 mm Durchmesser beschattet nicht nur die Sonne selbst, sondern zur Sicherheit auch ihre weitere Umgebung, insgesamt ein Feld von 7° Winkeldurchmesser. Dadurch erreicht man, daß beim Passieren der Himmelsstrahlung durch die innerste Öffnung des Behälters kein Streulicht der Sonne den Empfänger erreichen kann. Die äußere Form dieses neuesten Pyranometertyps ist aus Abb 21, Ziff 18 ersichtlich. In den letzten Jahren wird auf den Beobachtungsstationen des Smithsonian-Observatoriums dieses Pyranometer immer mit einem Zwillingspaar von Pyrhelometern auf einer gemeinsamen Montierung befestigt, so daß auf diese Weise die Bedienung aller

¹ Smithson Ann 5, S 92 (1932)

Instrumente gleichzeitig erfolgen kann Abb 19 zeigt eine solche Aufstellung an der Mt Brukkaros-Station des Smithsonian-Observatoriums

17 Die Anwendung des Pyranometers bei den „kurzen“ Methoden zur Bestimmung der Solarkonstante Die Anwendung des Pyranometers bei der Bestimmung der Solarkonstante führt zu einem vereinfachten Beobachtungs- und Reduktionsverfahren, das von den Smithsonian-Beobachtern im Gegensatz zu der in Ziff 15 dargelegten ursprünglichen LANGLEY-ABBOISCHEN Methode als „kurze Methode“ (s. ds. Handb IV, Kap 1, Beitrag BERNHARDT, Ziff 23) bezeichnet wird. Es handelt sich hier einmal um die kurze Methode, die 1918 in Calama eingeführt wurde (Methode I). Dabei entfällt die spektrobolometrische Bestimmung der Transmissionskoeffizienten der Atmosphäre für verschiedene Wellenlängen. Eine weitere Vereinfachung brachte dann die neue Montezuma-Methode (Methode II), bei der das Spektrobolometer nur mehr zum Zwecke der Bestimmung der Infrarotabsorption benutzt wird. Gewisse Abänderungen der Methode sind neuerdings für die Stationen Table Mountain und Mt Brukkaros zur Einführung gekommen (Methode III).

Die erste kurze Methode¹ geht von folgender Überlegung aus. Die Durchlässigkeit der Atmosphäre ist im wesentlichen vom Feuchtigkeitsgrad und von Staubpartikelchen der Luft abhängig. Nach den grundlegenden Untersuchungen von FOWLE² ist die Intensität der Infrarotbanden $\rho\sigma\tau$ bzw. Ψ für den Gehalt an Wasserdampf charakteristisch. Man kann, wie dies auch bei der ursprünglichen langen Methode der Fall ist (Ziff 15), das Verhältnis ρ/ρ_{*c} als Maß des bei der Beobachtung herrschenden Wasserdampfgehaltes der Luft heranziehen, wobei ρ die Ordinate des Fußpunktes dieser Bande und ρ_{*c} die Ordinate ihrer höchsten Erhebung im Bologramm bedeuten. Andererseits hat es sich erwiesen, daß für den Grad der Verunreinigung der Atmosphäre durch Staub und Partikelchen vulkanischen Ursprungs die Himmelsheelligkeit charakteristisch ist, wie sie mit Hilfe des Pyranometers ermittelt werden kann. Es läßt sich dann der Zustand der Atmosphäre durch eine Funktion F ausdrücken. Man erhält z. B. für eine Beobachtung bei der Luftmasse $m = 2$

$$F_2 = \frac{H_2}{\rho/\rho_{*c}},$$

wobei H_2 das Ergebnis der Pyranometermessung darstellt. Es wurde nun aus dem Material eines längeren Zeitraumes, aus dem Beobachtungen gleichzeitig mit Bolometer und Pyrheliometer, aber auch mit Pyranometer vorlagen, die Beziehung zwischen F und den nach der alten Methode ermittelten Transmissionskoeffizienten der Atmosphäre für verschiedene Wellenlängen abgeleitet, und zwar sowohl für Luftmasse 2 wie 3. Derart gewann man Korrektortabellen, aus denen für eine bestimmte beobachtete Luftmasse und ein bestimmtes F die Transmissionskoeffizienten unmittelbar entnommen werden konnten. Es erubrigt sich dann zur Bestimmung der Solarkonstante nur mehr die Extrapolation auf Luftmasse $m = 0$, die in ganz analoger Weise wie bei der alten Methode erfolgt. Mit Hilfe des gefundenen Transmissionskoeffizienten und der gegebenen Luftmasse wird die Fläche B des Bologramms ausgemessen und, nachdem noch die Fläche C der Absorptionsbanden berücksichtigt ist, auf die Fläche A eines extraterrestrischen Bologramms umgerechnet. Ist schließlich das Ergebnis der gleichzeitig mit der Pyranometermessung vorgenommenen Beobachtung mit dem Pyrheliometer P , die mittlere Distanz Sonne-Erde δ_0 und die Distanz zur Zeit der Beobachtung δ_1 , so ergibt sich die Solarkonstante aus der Beziehung

$$S = P \frac{A}{B - C} \left(\frac{\delta_1}{\delta_0} \right)^2$$

¹ Smithsonian Ann 4, S 79ff (1922)

² Ap J 38, S 392 (1913)

Die neue Vereinfachung der „kuizen Methode“ (Methode II), wie sie nunmehr in der Station Montezuma in Gebrauch steht¹, benutzt das Bologramm nur mehr für die Ausmessung der Absorptionfläche im Infraroten und ersetzt die Ausmessung der übrigen Teile durch die Verwendung von Tabellen, die aus sorgfältig ausgewählten Eichdaten aufgebaut werden. Beobachtet wird wieder gleichzeitig mit Pyrheliometer und Pyranometer. Im Bologramm wird nunmehr die Fläche der Bande Ψ bei λ 11 000 ausgemessen, sie tritt an Stelle der früher verwendeten Bande bei λ 9200 (s. die diesbezügliche Bemerkung in Ziff 15). Ist D die Fläche

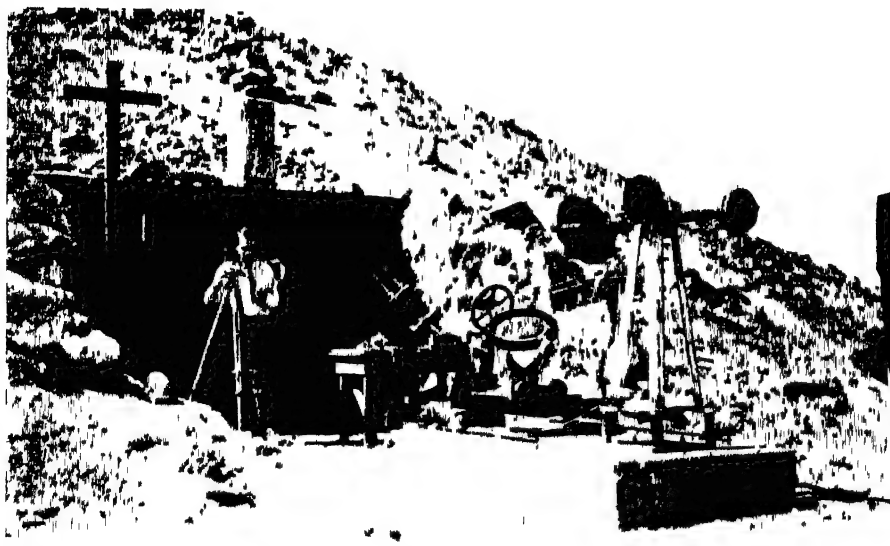


Abb 20 Teilbild der chilenischen Station Montezuma (2700 m) des Smithsonian-Observatoriums. Infolge der hervorragenden Beobachtungsbedingungen besitzen die hier gewonnenen Daten der Solarkonstante das doppelte Gewicht der an den übrigen Bergstationen erzielten Ergebnisse [Smithson Ann 5 (1932)]

von Ψ in mm^2 , H die Pyranometerablesung, reduziert auf g_{cal} , und P das Ergebnis der Pyrheliometermessung, so ergibt sich vorerst ein Wert der Funktion F

$$F = \frac{H \cdot D}{P}$$

Geht man nun mit dem auf eine Standardluftmasse reduzierten Wert von F in eine Tabelle ein, so findet man zu dem Argument der beobachteten Luftmasse m unmittelbar a_i , d. h. die Fläche innerhalb der Atmosphäre, die bisher immer erst aus den Bologrammen gewonnen werden konnte. Die Tabelle liefert außerdem a_0 , die theoretisch zu erwartende Fläche des Bologramms außerhalb der Atmosphäre. An die beobachtete Fläche a_i sind wie bei der langen Methode noch mehrfache Korrekturen anzubringen, die aber hier durchweg aus Tabellen entnommen werden können. Man bildet den Ausdruck

$$I = \frac{a_0}{a_i} \cdot K_i \cdot K_s$$

wobei K_s sich aus den Korrekturen für den von der Strahlungsmessung nicht erfaßten ultravioletten und infraroten Bereich der Sonnenstrahlung (s. Ziff 15),

¹ Smithson Ann 5, S. 110 ff. (1932)

K_s aus den Korrekturen für die H_2O -Banden und die von der Luftmasse m abhängigen „ m -Banden“ zusammensetzt. Verschiedene Tabellen liefern sowohl die den beobachteten F und m entsprechenden beiden K_r -Werte, als auch die beiden K_s -Werte. Ist schließlich p der Reduktionsfaktor für die Umwandlung der Pyrheliometerablesung in $gcal$, so ergibt sich die Solarkonstante aus

$$S = IP p \left(\frac{\delta_1}{\delta_0} \right)^2$$

Diese verbesserte Methode der Pyranometerreduktion (Methode II), die sich nach den Angaben der Beobachter in Montezuma bewahrt haben soll, hat nun in den Stationen Table Mountain und Mt. Brukkaros vielfach zu unzuverlässigen Ergebnissen geführt. Man war daher gezwungen, neuerliche Abänderungen durchzuführen¹, die eine noch bessere Erfassung der störenden Einwirkung der jeweils auf diesen Stationen herrschenden Lufttrübungen ermöglichen sollten (Methode III). Zu diesem Zweck wurde aus dem Zeitraum 1925 bis 1930 das Material von 1000 Tagen gesichtet und der Gang der Werte der Pyranometermessungen mit der Luftfeuchtigkeit abgeleitet. Es ergab sich dann für die Luftmasse $m = 2$ statistisch eine bestimmte Kurve, die ABBOT als normale Pyranometrie bezeichnete. Andererseits wurde in weiteren Eichkurven für bestimmte Wellenlängen auch der Zusammenhang zwischen den atmosphärischen Transmissionskoeffizienten und der Feuchtigkeit festgelegt. Nun untersuchte man, welche Abweichungen von diesen Kurven eintreten, sobald Tage herangezogen werden, die nicht mehr eine „normale Pyranometrie“ gezeigt haben. Trägt man nun diese Abweichungen als Ordinaten und die Pyranometerexzesse selbst als Abszissen auf, so erhält man für bestimmte Feuchtigkeitswerte neue Reduktionskurven. Man konnte nach diesen Vorarbeiten nunmehr zur Berechnung der Solarkonstante auf die kurze Calama-Methode (Methode I) übergehen, mußte aber dann wieder die mühevollen Auswertungen des Bologrammes hinzunehmen. Um dies zu vermeiden, wurde entschieden, sich der verbesserten Montezuma-Methode (Methode II) zu bedienen. Um die hierfür entwickelten Tabellen verwenden zu können, war es nur noch nötig, Zwischentabellen zu schaffen, die auf Grund eines sorgfältig ausgewählten Eichmaterials die Funktion F , reduziert auf die Luftmasse $m = 2$, für jeden möglichen Wert der Feuchtigkeit und des Pyranometerexzesses ergeben.

f) Die Ergebnisse der Messungsmethoden der Solarkonstante.

18 Die Zuverlässigkeit der Pyranometermessungen. Die Messungen mit dem Pyranometer werden nunmehr auf allen Beobachtungsstationen des Smithsonian-Observatoriums durchgeführt und haben sich im allgemeinen gut bewährt. Die Möglichkeit, wiederholt am Tage vollständige Messungen durchzuführen, und die verhältnismäßig einfachen Reduktionen nach den kurzen Methoden haben in den letzten Jahren eine ganz wesentliche Vermehrung der verfügbaren Daten gebracht, wie es mit Zuhilfenahme der alten Methode zur Bestimmung der Solarkonstante nie denkbar gewesen wäre.

Das Pyranometer ist ein zuverlässig arbeitender Meßapparat. Wichtig ist auch der Umstand, daß erst ein Fehler von 20% im Pyranometerergebnis einen Fehler von 1% in dem schließlichen Wert der Solarkonstante hervorrufen kann. Im Laufe der Jahre haben sich nur zweimal nennenswerte Unstimmigkeiten gezeigt, die leicht zu beheben waren. So ergaben im August 1927 die Beobachtungen von Table Mountain einen plötzlichen Anstieg in den Werten der Solarkonstante,

¹ Smithsonian Ann. 5, S. 114ff. (1932)

der, wie freilich erst im September 1928 festgestellt wurde, darauf zurückzuführen war, daß durch Schadhaftwerden der Schwarzung der äußersten Pyranometerblende Sonnenstreulicht in die Apparatur eingedrungen ist. Der Meßfehler ließ sich jedoch nachtraglich für die einzelnen Monate zahlenmäßig bestimmen. Es mußte die Solarkonstante um rund 0,003 gcal oder etwa 0,1% korrigiert werden. Bei einer zweiten Änderung der Pyranometerkonstante, die kurz darauf eintrat und ebenfalls technischer Natur war, ergab sich ein Fehler in der Solarkonstante von 0,002 gcal.

Die Zuverlässigkeit der ermittelten Werte der Solarkonstante wird daher wohl kaum durch die Verwendung des Pyranometers gefährdet, zweifellos aber durch die Schwierigkeiten, die die Reduktionsmethoden selbst mit sich bringen.

Wenn auch die drei genannten kurzen Methoden zur Bestimmung der Solarkonstante eine nicht zu unterschätzende Arbeitsverminderung bedeuten und zugleich auch prinzipielle Verbesserungen in sich schließen, so kann doch nicht verhehlt werden, daß mit den mehrfachen Vereinfachungen ungeachtet aller sorgfältigen Vorrichtungen naturgemäß auch nicht unbedenkliche Schematisierungen verbunden sind. So kann man die meisten Eichkurven, die den in Ziff 17 genannten Tabellen zugrunde liegen, wohl kaum als gesichert ansehen, da die Einzelwerte, auf denen sie aufgebaut sind, ganz außer-

ordentlich streuen¹. Die Beobachter des Smithsonian-Observatoriums glauben jedoch den Ergebnissen nach den „kurzen“ Methoden zumindest gleiche Genauigkeit zuschreiben zu können wie denjenigen, die nach der ursprünglichen „langen“ Methode von LANGLEY und ABBOI gewonnen sind. Theoretisch mußten die kurzen Verfahren sogar vorzuziehen sein, da sie den momentanen Luftzustand mit Hilfe der zusätzlichen Pyranometermessungen noch wesentlich scharfer erfassen. Dies wäre für die Zuverlässigkeit der Endergebnisse von großer Bedeutung. Es hat sich nämlich gezeigt, insbesondere durch Untersuchungen von T. E. ECKERSLEY², H. KNOX-SHAW³ und W. E. BERNHIEIMER⁴, daß die nach der langen Methode ermittelten

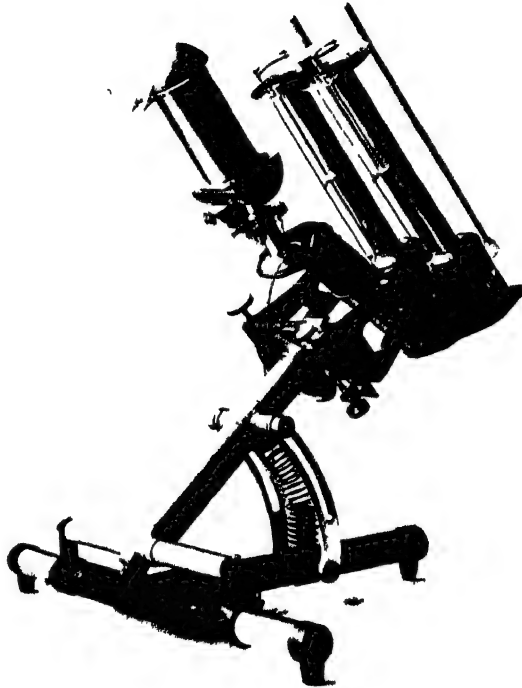


Abb. 21 Die neueste Pyranometertype (links) in gemeinsamer Montierung mit der verbesserten Form des Silver-Disk-Pyrheliometers (Zwillingsystem), wie sie nunmehr auf den Stationen des Smithsonian-Observatoriums in Verwendung stehen [Smithson Ann 5 (1932)]

¹ Siehe z. B. Smithson Ann 5, Fig. 17, S. 116 und Fig. 18, S. 117 (1932).

² Helwan Bull. 14 (1914). ³ Helwan Bull. 17 (1915), 23 (1921), 30 (1924).

⁴ Seeliger-Festschr. 1924, s. auch ds. Handb. IV, Kap. 1, Ziff. 22.

sog definitiven Solarkonstanten von den Transmissionskoeffizienten der Erdatmosphäre, wie sie an den gleichen Tagen beobachtet wurden, nicht unabhängig waren. Bei der kurzen Methode ist, wie in der vorhergehenden Ziffer auseinander gesetzt, die Trübung der Atmosphäre zweifellos schon besser berücksichtigt, doch sind, wie BERNHEIMER¹ zeigen konnte, auch bei den nach Methode I in Calama ermittelten Solarkonstanten die genannten Zusammenhänge noch nicht aufgehoben. Es scheint dies u. a. darauf zurückzuführen sein, daß die Berücksichtigung der Absorptionsbanden bei der Auswertung des Bologramms nicht hinreichend ist. Der bei der Methode II bewerkstelligte Ersatz der Bande $\rho\sigma\tau$ durch die Bande Ψ , die für den momentanen Himmelszustand offenbar ein geeigneteres Maß darstellt (siehe auch die Bemerkung zu Abb 17, Ziff 15), hat nur wenig geholfen. Diese großen Schwierigkeiten, die eigentlich die Berechnung von „absoluten“ Solarkonstanten illusorisch machen, werden im übrigen neuerdings auch von ABBOT² anerkannt. Er stellt sogar fest, daß man niemals hoffen könne, eine ganz zuverlässige Messung der Wasserdampfabsorption zu erhalten, wie sorgfältig auch die Wasserdampfbanden im Infraroten bestimmt worden sind. Dasselbe gelte auch für die Festlegung des Zusammenhanges zwischen der Funktion F und a , den Transmissionskoeffizienten der Atmosphäre für verschiedene Wellenlängen, eine Festlegung, die nur angenähert erfolgen könne. Aus diesen Gründen sind auch heute noch die nach der langen Methode abgeleiteten „definitiven“ Werte der Solarkonstante von der Luftfeuchtigkeit abhängig, die nach den kurzen Methoden gewonnenen von dem Wasserdampfgehalt bzw. der Funktion F . Sie können also strenggenommen nicht als Daten für die extraterrestrische Sonnenstrahlung angesehen werden.

19. Versuche zur Verbesserung „definitiver“ Werte der Solarkonstante

Die in der vorhergehenden Ziff 18 dargelegten Schwierigkeiten, den Einfluß atmosphärischer Störungen bei der Bestimmung der Solarkonstante direkt zu eliminieren, führten zu dem Versuche, den Korrekturen auf statistischen Wegen beizukommen. Bei den Messungen nach den kurzen Methoden, die ein großes Material gleichzeitig von mehreren Stationen geliefert haben, wurde folgender Weg³ beschritten. Man hat die definitiven Solarkonstantenwerte in Gruppen zusammengefaßt, wobei zu jeder Gruppe Daten mit identischem Wasserdampfgehalt der Atmosphäre herangezogen wurden. Dasselbe geschah für die Ergebnisse einer zweiten Station. Da die Solarkonstante an einem bestimmten Tage für beide Stationen als gleich groß angenommen werden kann, so ergeben dann die Vergleiche der Stationen eine große Zahl von unabhängigen Beziehungen, aus denen der Übergang von einer Gruppe zu einer anderen hinsichtlich der Einwirkung des Atmosphärenzustandes auf die „definitiven“ Solarkonstanten abzuleiten war. Einzelheiten dieser Korrekturmethode und ihre Ergebnisse sind nicht veröffentlicht, eine Nachprüfung ist demnach nicht möglich. Ein anderes Verfahren zur Verbesserung „definitiver“ Solarkonstantenwerte ist auf die sog. „Selected Pyrheliometry“ gegründet. C F MARVIN⁴ hat wohl zuerst darauf aufmerksam gemacht, daß eine unabhängige Methode zur Bestimmung eventueller Schwankungen der Solarkonstante darin bestünde, daß man, bei Verzicht auf eine Extrapolation auf die extraterrestrische Strahlung, die Ergebnisse der Pyrheliometermessungen zweier Stationen hinsichtlich ihres Ganges untersucht, vorausgesetzt, daß sie bei gleichen Luftmassen und angenähert gleicher Luftdurchlässigkeit gewonnen worden sind. 1926 wurde die Methode von ABBOT⁵ kurz beschrieben⁶.

¹ I c ² Smithsonian Ann 5, S 120 (1932)

³ C G ABBOT, Smithsonian Ann 5, S 120 (1932)

⁴ M Weather Rev 53, Nr 7 (1925)

⁵ M Weather Rev 54, S 191 (1926), s auch Smithsonian Misc Coll 80, Nr 2 (1926)

⁶ Siehe auch Beitrag BERNHEIMER, ds Handb IV, Kap 1, Ziff 24

Neuerdings ist die Methode für Montezuma angewendet worden¹, wobei für den Zeitraum 1920 bis 1924 sowie 1925 bis 1929 alle Pyrhelometerergebnisse gleicher Luftfeuchtigkeit monatweise untersucht wurden. Die mittlere Abweichung der Werte war von der Größenordnung eines halben Prozentes, ein Umstand, der auf die Zuverlässigkeit der Beobachtungsmethode hinweist. Die übriggelassene geringfügige jährliche Variation der Abweichungen in den beiden Perioden hatte einen verschiedenen Charakter und wird von ABBOT zum Teil reellen Schwankungen der Solarkonstante zugeschrieben. Die Daten der „Selected Pyrheliometry“ gestatten schließlich auch die gewonnenen Beobachtungsergebnisse der neuen Bergstationen an die alte Mt Wilson-Skala anzuschließen. So ließen sich für Montezuma zu bestimmten Werten von m und F statistisch ermittelte diesbezügliche Korrekturen ableiten. Je nach den zugehörigen F und m ergeben sich Korrekturen zwischen 0,01 und 0,04 gcal. Inwieweit gerade die alte Skala als absolut angesehen werden kann, ist heute wohl nicht ohne weiteres zu entscheiden, muß aber eher bezweifelt werden. So haben in jüngster Zeit Messungen mit dem ABBOTschen neuen Water-Flow-Pyrheliometer Nr 5 (s. Ziff 39) gezeigt, daß die alte Absolutskala allem Anschein nach

Tabelle 3 Dekadenmittel der Solarkonstante 1920 bis 1930
(„Preferred Solar Constants“ ABBOTs, siehe Text S 452)

Dekade	1920	1921	1922	1923	1924	1925	1926	1927	1928	1929	1930
Januar 1	1,968	1,964	1,938	1,934	1,936	1,945	1,939	1,940	1,937	1,929	1,935
2	67	56	45	24	40	39	40	39	32	33	38
3	59	50	48	18	41	47	34	37	37	32	36
Februar 1	58	42	44	25	36	41	35	39	44	33	34
2	54	54	49	34	35	49	41	44	40	27	40
3	56	54	48	(15)	37	40	30	42	41	30	43
Marz 1	59	54	47	25	44	41	38	36	47	29	40
2	48	39	41	30	41	36	39	43	46	30	37
3	32	42	32	30	39	41	34	43	45	31	39
April 1	48	49	30	33	39	45	30	44	43	32	41
2	56	45	30	25	43	50	35	47	39	10	38
3	52	46	25	31	44	46	40	45	42	37	39
Mai 1	50	50	23	27	43	46	38	46	42	38	42
2	61	49	32	30	46	50	38	42	49	34	42
3	50	50	24	34	47	54	43	45	46	35	42
Juni 1	43	27	20	18	51	43	39	50	46	35	45
2	34	39	15	32	53	43	45	44	51	32	44
3	38	36	12	32	53	48	41	45	45	32	40
Juli 1	45	52	00	34	46	52	41	48	43	33	44
2	40	53	13	28	50	54	44	45	39	32	50
3	51	48	23	44	43	47	41	46	40	34	46
August 1	30	44	17	42	50	49	43	43	41	31	44
2	27	57	19	40	40	41	41	40	34	32	41
3	32	37	21	41	30	42	42	42	38	30	41
September 1	51	50	21	15	41	56	41	41	41	28	39
2	44	57	(15)	43	50	46	38	41	35	28	34
3	44	50	19	40	46	50	43	48	23	32	41
Oktober 1	42	55	26	42	50	42	36	45	29	31	37
2	51	61	21	42	50	49	37	43	32	33	37
3	38	53	14	39	49	46	31	41	27	30	38
November 1	52	58	28	34	47	44	32	43	25	32	38
2	48	52	25	43	49	48	30	43	29	35	39
3	43	55	20	41	44	44	32	43	30	40	35
Dezember 1	57	53	25	42	42	44	35	44	29	41	40
2	57	50	22	40	47	45	34	38	26	39	43
3	1,949	1,948	1,930	1,922	1,939	1,946	1,935	1,938	1,932	1,939	1,949

¹ Smithsonian Ann 5, S 133 (1932)

um nicht weniger als 2,5% zu hoch ist. Demnach wurde der bisher als richtig angenommene Mittelwert der Solarkonstante (Mittel der Jahre 1920 bis 1930) von 1,94 auf 1,89 herabgesetzt werden müssen. Wenn auch bisher diese Korrektur noch nicht berücksichtigt wurde, so wird sich dies in Zukunft wohl nicht umgehen lassen, um so mehr, als für eine Reihe von Problemen der Fixsternastronomie ein gesicherter Absolutwert der Solarkonstante von Wichtigkeit ist.

20 „Preferred Solar Constants“ In diesem Zusammenhang mag es von Interesse sein, eine Zusammenstellung der neuesten Werte der Solarkonstante zu geben. Es ist wohl kein Zweifel, daß die in Amerika vorgenommenen Messungen bis zur Errichtung der Station Calama in Chile noch nicht eine derartige Genauigkeit besitzen, daß es sich lohnt, auf Einzelwerte einzugehen. Von erheblich größerer Genauigkeit sind die Messungen des Zeitraumes von 1920 bis 1930, um so mehr, als sie größtenteils gleichzeitig an mehreren Stationen angestellt wurden. Die in früheren Veröffentlichungen mitgeteilten Ergebnisse aus dieser Zeit sind 1932 von ABBO¹ nach mehreren Gesichtspunkten revidiert und schließlich die wahrscheinlichsten Werte der Dekadenmittel und Monatsmittel in der letzt erschienenen Veröffentlichung¹ mitgeteilt worden. In Tabelle 3 geben wir vorerst jene Dekadenmittel für die Jahre 1920 bis 1930, die als wahrscheinlichste Werte bezeichnet wurden. Bis einschließlich Dezember 1925 haben zur Ableitung dieser Daten Beobachtungen von Calama, Harqua Hala und Montezuma gedient. Für die Jahre 1926 bis 1930 beziehen sich die Daten vorwiegend auf solche Montezuma-Tage, an denen nach der kurzen Methode (s. Ziff 18) beobachtet wurde. Diese Werte sind gemittelt und die Beobachtungen anderer Stationen dann auf dieses System reduziert worden. Die 10-Tages-Mittel dieser Tabelle sollen im allgemeinen befriedigende Werte darstellen, doch sind die Monatsmittel, im übrigen für die Jahre nach 1926 auf Daten gegründet, die zum Teil von den Grundlagen zu der Tabelle der Dekadenmittel abweichen, offenbar von höherer Zuverlässigkeit. Diese nach ABBO¹ wahrscheinlichsten Werte der Monatsmittel der Solarkonstante von 1920 bis 1930 sind in Tabelle 4 wiedergegeben. Für die Jahre 1920 bis 1925 stellen diese Werte Mittelwerte aus den Daten der vorhergehenden Tabelle dar und beruhen demnach auf Beobachtungen von Harqua Hala, Calama sowie auf Montezuma-Beobachtungen nach der kurzen Methode. Für die Zeit von 1926 bis 1930 sind es gewichtete Mittelwerte dreier Stationen, wobei den Ergebnissen von Montezuma das Gewicht 2, jenen von Table Mountain und Mt Brukkaros je das Gewicht 1 zuerkannt wurde. Für

Tabelle 4 Monatsmittel der Solarkonstante 1920 bis 1930
(„Preferred Solar Constants“ ABBO¹, siehe Text)

1920	1921	1922	1923	1924	1925	1926	1927	1928	1929	1930	
1,965	1,957	1,944	1,925	1,938	1,944	1,940	1,911	1,938	1,933	1,911	Januar
56	50	47	25	36	43	36	12	12	33	10	Februar
46	45	40	28	41	39	37	13	15	32	39	März
52	47	28	30	42	47	36	44	12	31	11	April
54	50	26	30	45	50	40	44	46	36	14	Mai
38	34	16	27	52	45	13	17	18	33	13	Juni
45	51	12	35	46	51	42	45	13	33	43	Juli
30	46	19	41	40	41	43	43	40	32	11	August
46	52	18	43	46	51	41	44	39	29	35	September
44	56	20	41	50	46	35	14	31	31	35	Oktober
48	55	24	39	47	45	32	44	29	38	38	November
54	50	26	30	43	45	38	41	28	12	11	Dezember
1,948	1,949	1,927	1,933	1,944	1,946	1,939	1,943	1,938	1,934	1,910	Jahresmittel

¹ Smithsonian Ann. 5, S. 277 (1932)

die genannte Zeit liegen tatsächlich Monatsmittel dreier Stationen vor, wodurch zweifellos den Daten größere Wahrscheinlichkeit zukommt. Nur in 3 Fällen gründen sich die Tabellenwerte der letzten 5 Jahre auf zwei Stationsergebnisse. Die Ausnahmen sind folgende: 1927 Juni fehlt Mt Brukkaros, 1928 September und 1929 Januar Montezuma.

Über die Fragen der Veränderlichkeit der Solarkonstante wird an anderer Stelle dieses Handbuchs berichtet¹. Hier sei nur hervorgehoben, daß die verschiedenen Verbesserungen der Beobachtungsmethoden, die im Laufe der Jahre zur Einführung gelangt sind, zweifellos auch eine Verminderung der Streuung in den „definitiven“ Werten der Solarkonstante mit sich gebracht haben. Die großen Schwankungen von mehreren Prozenten, die noch bis 1918 auf dem Mt Wilson beobachtet wurden, sind in Calama nicht mehr aufgetreten. Noch geringer wurden die Schwankungen dann in Montezuma, Harqua Hala bzw. auf den neuen Stationen in Table Mountain und Mt Brukkaros. Aus dem neuen derzeit verfügbaren Material der Tabelle ergeben sich nunmehr folgende in Tabelle 5 wiedergegebene Jahresmittel und ihre Streuung.

Wie aus Tabelle 5 hervorgeht, hat die Abnahme der Schwankungen auch in den letzten Jahren neue Fortschritte gemacht. Einzig 1928 hat aus unbekannten Gründen eine etwas höhere Veränderlichkeit gezeigt. Jedenfalls ist es bemerkenswert, daß die an und für sich bereits sehr geringe mittlere Jahresstreuung im Zeitraum 1920 bis 1924 im Betrage von 0,39%, im Zeitraum 1925 bis 1930 selbst mit Einschluß des Jahres 1928 auf

Tabelle 5. Jahresmittel der Solarkonstante 1920 bis 1930 und ihre Streuung

Jahr	Solarkonstante	Streuung in	
		grd	Proz
1920	1,948	$\pm 0,0087$	$\pm 0,45$
1921	49	59	30
1922	27	108	56
1923	33	60	31
1924	44	46	24
1925	46	35	17
1926	39	31	17
1927	43	17	09
1928	38	65	34
1929	34	24	12
1930	40	28	14

0,17%, demnach unter die Hälfte herabgegangen ist. Es ist vielleicht nicht unberechtigt, hieraus den Schluß zu ziehen, daß die Realität der Schwankungen, soweit sie auf extraterrestrische Ursachen zurückgeführt wird, kaum als gesichert angesehen werden kann.

g) Bolometer und Thermoelement bei Strahlungsuntersuchungen der Sonnenflecke und der Korona

21 Die Arbeiten von 1905 und 1922 zur Intensitätsmessung der Sonnenflecke. Die an sich nahehegende Aufgabe, das Spektrobolometer bei Untersuchungen der Energieverteilung im Spektrum der Sonnenflecke heranzuziehen, ist, soweit bekannt, nur ein einziges Mal bei den Versuchen ABBOTTS² von 1905 am Snow-Teleskop des Mt Wilson-Observatoriums durchgeführt worden. Es wurde dasselbe Spektrobolometer, das auch zu den sonstigen Strahlungsmessungen gedient hatte, verwendet, nur die Höhe des Spaltes darauf verkleinert, daß bei Einstellung auf die Mitte des zu untersuchenden Fleckes die Spalthöhe noch kleiner war als der Fleck im Durchmesser. Spezielle Ergebnisse liegen nur von einem einzigen Tage vor, an dem sieben Bologramme aufgenommen und aus ihnen Energiewerte für die Wellenlängen λ 4480, λ 7990, λ 12180 und λ 21150 erhalten wurden. Innerhalb des Sonnenfleckes hat man die Inten-

¹ Beitrag BERNHEIMER, ds. Handb. IV, Kap. 1

² Smithsonian Ann. 2, S. 233 (1908)

sität von vier verschiedenen wohldefinierten Punkten gemessen und jedesmal das Intensitätsverhältnis zur umgebenden Photosphäre bestimmt. Aus den wenigen Daten geht nur hervor, daß einerseits das Intensitätsverhältnis Fleck/Photosphäre gegen das Fleckenzentrum hin abnimmt, wie es — aber freilich nur für kleine Flecken — bereits von K SCHWARZSCHILD und W VILLIGER¹ bei ihren Arbeiten im Bereiche von λ 3200 gezeigt wurde, und daß andererseits der Kontrast Fleck/Photosphäre nach den kurzen Wellen hin wesentlich zunimmt. Es steigt der Kontrast nach diesen Messungen von λ 21150 bis λ 4480 auf etwa das Doppelte an. Vom Beobachter wird festgestellt, daß die absoluten Intensitätswerte in einzelnen Wellenlängen des Fleckes wohl zu hoch sein durften, da im Fleckengebiet Streulicht der Photosphäre mitgemessen wurde. Eine wichtige Fehlerquelle ist jedoch bei diesen Untersuchungen überhaupt nicht beachtet worden. Es fehlt jede Diskussion über den Strahlungsverlust, sowohl in der Apparatur wie auch in der Erdatmosphäre.

Ähnliche Versuche sind erst 1922 wieder aufgenommen worden², diesmal mit Verwendung von Thermoelementen in Verbindung mit einem Monochromator. Diese Untersuchungen wurden von E PETTIT und S B NICHOLSON mit dem 150 Fuß-Turmteleskop des Mt Wilson-Observatoriums angestellt. Das Arbeitsprogramm bestand neben der Erforschung der spektralen Energieverteilung hier auch in einer direkten Bestimmung der Gesamtstrahlung der Umbra mit Hilfe eines Thermoelementes. Das Element befand sich unmittelbar hinter einem mit einer Nadel durchstochenen Karton im Fokus des Turmteleskops. Durch diese Blende von etwa 0,01 mm Durchmesser wurde die Gesamtstrahlung der Umbra und der Photosphäre zu beiden Seiten des Fleckes gemessen. Das Intensitätsverhältnis Fleck/Photosphäre ergab sich zu 0,471 gegenüber 0,477, dem Wert, der sich aus der Vergleichung der von den Energiekurven eingeschlossenen Flächen berechnen ließ. Die gute Übereinstimmung ist bemerkenswert.

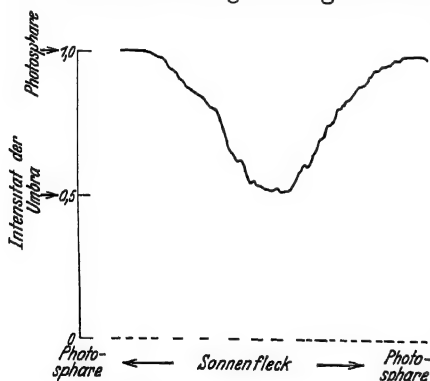


Abb 22 Registrierkurve der Gesamtstrahlung längs eines Sonnenfleckendurchmessers. Gemessen mit Thermoelement auf dem Mt Wilson
[Ap J 71 (1930)]

Das Thermoelement in Verbindung mit dem „Nadelstichdiaphragma“ fand bei diesen Untersuchungen überdies auch zur Festlegung des Energieverlaufes der Gesamtstrahlung längs eines Fleckendurchmessers Verwendung. Die beim langsamen Vorbeiziehen des Fleckes jeweils erhaltenen Galvanometerauslässe wurden photographisch registriert und derart die in Abb 22 wiedergegebene Intensitätskurve gewonnen. Auffallend ist hier die kontinuierliche Abnahme der Totalenergie von der Photosphäre über die Penumbra zur Umbra. Dieses einfache und direkte Meßverfahren, seit 1922 kaum wieder angewendet, verdient in Zukunft für systematische Fleckenuntersuchungen herangezogen zu werden, da derartige, regelmäßig vorgenommene Messungen wegen ihres objektiven Charakters zweifellos von großem Werte waren. Diese Beobachtungen sind um so mehr von besonderem Interesse, als die genannten, in Abb 22 wiedergegebenen, Ergebnisse aus Gesamtstrahlungsmessungen bei selektiven Strahlungsuntersuchungen nicht bestätigt worden sind. So hat eine photographische Photo-

¹ Ap J 23, S 345 (1906)

² E PETTIT u S B NICHOLSON, Ap J 71, S 153 (1930)

metrie im Ultravioletten durch H SIREBEL und B THURING¹ eine deutliche Aufhellung des Innenrandes der Penumbra ergeben. Ein ähnliches Verhalten ist auch in einigen Fällen durch Untersuchungen von N BARABASCHEFF und B SEMEJKIN², die mit Diapositivplatten und Gelbfilter gearbeitet haben, angedeutet worden.

Bei den amerikanischen Messungen der spektralen Energieverteilung leitete man die Strahlung durch das oben erwähnte Diaphragma auf den Spalt eines Monochromators³, der mit einem Vakuum-Thermoelement in Verbindung stand. Die Galvanometerauslässe wurden photographisch registriert, wobei die Anordnung derart reguliert war, daß das Spektrum von λ 4000 bis λ 20000 innerhalb von 15 Minuten durchlaufen wurde. Auf derselben Platte wurden drei

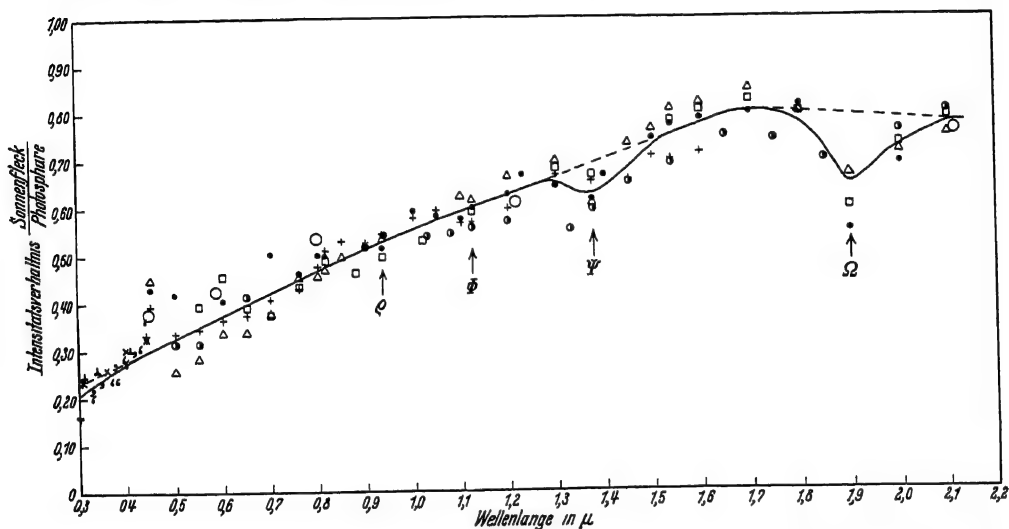


Abb 23 Die Energiekurve des Intensitätsverhältnisses Sonnenfleck auf Photosphäre. Grund bolometrischer und thermoelektrischer Messungen. Die Zeichen o entsprechen den bolometrischen Ergebnissen von ABBOT, die übrigen Zeichen stellen die Ergebnisse verschiedener Meßserien dar, die PERRIT und NICHOLSON mit Thermoelement und Monochromator gewonnen haben. Die Pfeile unterhalb der Kurve geben die Stellen der Absorptionsbanden ψ , Φ , Ψ und Ω an. (Siehe auch Abb 17, S 440) [Ap J 71 (1930)]

Registrierkurven aufgenommen, eine von einem Punkt knapp nördlich der Penumbra, die zweite von einem Punkt der Umbra und die dritte von einem Punkt knapp südlich der Penumbra.

Die gewonnene Energiekurve des Intensitätsverhältnisses Fleck/Photosphäre ist in Abb 23 wiedergegeben. Die mit o bezeichneten Punkte entsprechen den 1905 von ABBOT bolometrisch bestimmten Werten. Die Übereinstimmung ist bemerkenswert. Ob die beiden konvexen Stellen der Kurve reell sind, ist von PERRIT und NICHOLSON nicht entschieden worden. Es ist aber wohl kaum zweifelhaft, daß diese Einsenkungen künstlich dadurch hervorgerufen wurden, daß es nicht gelungen ist, die Absorptionen der Wasserdampfbanden Ψ und Ω bei der Reduktion zu berücksichtigen. Diese Ansicht wird neuerdings auch von M MINNAERT und A J N WANDERS⁴ vertreten. Im übrigen machen die beiden Forscher

¹ Z f Astrophys 5, S 96 (1932)

² Z f Astrophys 5 S 54 (1932)

³ Konstruktion von HILGER, beschrieben in Ap J 66, S 43 (1927), Mt Wilson Contr

Nr 336

⁴ Z f Astrophys 5, S 297 (1932)

mit Recht darauf aufmerksam, daß den amerikanischen Beobachtungen noch ein weiterer Fehler anhaftet, der auch bei den ABBOT'schen Resultaten hervor-
gehoben wurde. Es bedarf noch einer Korrektur für den Strahlungsverlust in
Apparatur und Erdatmosphäre. MINNAERT und WANDERS nehmen an, daß die
an die Fleckenintensitäten anzubringenden Korrekturen für alle Wellenlängen
10% der Photosphärenstrahlung betragen, und kommen dann zu dem bedeu-
tsamen Ergebnis, daß die von PETTIT und NICHOLSON mit Monochromator und
Thermoelement gewonnene Intensitätskurve in sehr guter Übereinstimmung
stehe zu der theoretischen Kurve, die sich beim Vorherrschen eines reinen Strah-
lungsgleichgewichtes in den optisch zugänglichen Gebieten eines Sonnenfleckes
berechnen läßt.

22 Die Untersuchungen der Korona mit Bolometer und Thermosaule Die
meisten Untersuchungen der Korona sind mit photographischen Methoden an-
gestellt worden, behandeln demnach nur die Strahlung in einem ausgewählten

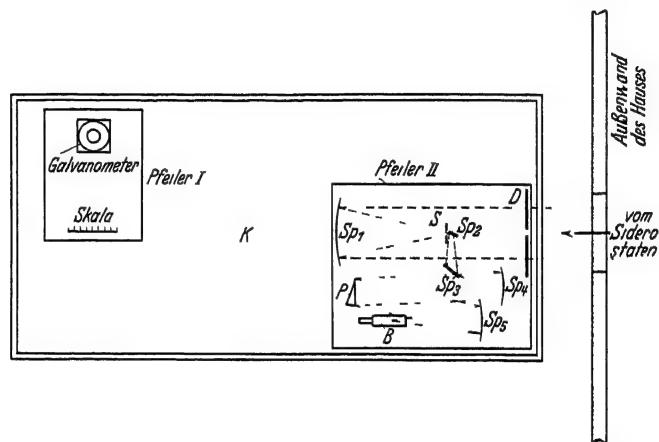


Abb 24 Die erste Versuchsanordnung zur spektrobolometrischen Messung der Korona-
strahlung, ausgeführt von C G ABBOT und C E MINDENHALL bei der Sonnenfinsternis
1900 Mai 28 [Ap J 12 (1900)]

Spektialbereiche. Dasselbe gilt für die Untersuchungen mit lichtelektrischem
Photometer, wie sie zum ersten Male 1918¹ und dann wieder bei der Finsternis
von 1922² ausgeführt wurden.

Eigentümlicherweise wurden nur bei wenigen Finsternissen Versuche unter-
nommen, zur Strahlungsmessung Bolometer und Thermosaule heranzuziehen,
obwohl es von großer Bedeutung wäre, auch die Gesamtstrahlung der Korona er-
fassen zu können. Die erste Anwendung des Bolometers erfolgte wohl im Jahre 1900³
durch Beobachter des Smithsonian-Observatoriums. Die gewählte instrumentelle
Anordnung ist aus Abb 24 ersichtlich. Innerhalb der doppelwandigen Beobach-
tungskammer *K* wurden auf dem Pfeiler I das Galvanometer und die Meßskala,
auf dem Pfeiler II das Bolometer und das optische Hilfsgerät aufgestellt. Die
Sonnenstrahlung, bzw. die Strahlung der Korona, fällt von dem außerhalb des
Hauses montierten Siderostaten durch ein Katzenaugen-Diaphragma *D* auf den
50 cm-Spiegel *Sp*₁, in dessen Brennpunkte der Spalt *S* und knapp hinter ihm
der kleine ebene Spiegel *Sp*₂ befestigt ist. Mittels des zweiten ebenen Spiegels
*Sp*₃ und des Kollimatorspiegels *Sp*₄ wird die Strahlung auf das an einer Fläche

¹ J STEBBINS u J KUNZ, Ap J 49, S 151 (1919)

² G H BRIGGS, Ap J 60, S 280 (1924)

³ C G ABBOT, Ap J 12, S 69 (1900)

versilberte Prisma P gelenkt und erreicht schließlich nach Reflexion an dem 26 cm-Spiegel Sp , das Bolometer B . Den mit dieser Apparatur gewonnenen Beobachtungen kann wegen zu großer Unsicherheit nur historische Bedeutung zukannt werden. Dasselbe gilt für die bei derselben Finsternis mit fast identischer Apparatur vorgenommenen Messungen von G. E. HALE¹. Dagegen haben bei der Sonnenfinsternis 1908 Januar 3 Versuche von ABBOT und MOORE² mit verbesserten Hilfsmitteln bereits positive Ergebnisse gebracht. Zur Verwendung kamen Bolometer großer Empfindlichkeit. 1 mm Ausschlag der Galvanometerskala entsprach einer Temperaturänderung von $1 \cdot 10^{-5}$ Grad. Es war Vorsorge getroffen, ausschließlich langwellige Strahlung untersuchen zu können. Zu diesem Zwecke wurde in den Strahlengang ein dünnes Asphalfilter eingeschoben. Andererseits verzichtete man auf Strahlung größer als 3μ , dadurch, daß vor dem Bolometer noch eine 3 mm dicke Glasplatte angebracht wurde. Beobachtet wurde mit einem parallaktisch montierten 50,5 cm-Spiegel von 100 cm Brennweite. Berücksichtigte man den Strahlungsverlust beim Durchgang durch die Glasplatte, so zeigte sich, daß die Strahlung der inneren Korona jener des Mondes gleichkam. Die Filtermessungen ergaben eigentümlicherweise, daß die Korona in einer Distanz von 0,25 Sonnenradien um 9% mehr infrarote Strahlen emittierte als die Sonne, wobei freilich zu berücksichtigen ist, daß die Strahlung über 3μ infolge des Glasfilters ausgeschlossen war.

Thermoelektrische Untersuchungen der Koronastrahlung sind bei der Sonnenfinsternis 1925 Januar 24 von zwei Expeditionen vorgenommen worden. Bei der einen Expedition haben H. T. STERSON und W. W. COBLENTZ⁴ an einem 15 cm-Spiegel von 127 cm Brennweite mit Thermoelementen gearbeitet. In der Absicht, noch weiter ins Infrarote zu kommen, als es bei den genannten Untersuchungen von 1908 der Fall war, wurde das Gehäuse der Vakuum-Thermosaule mit einem Fenster aus Flußspat versehen. Diese Thermosaule bestand aus fünf in Serie geschalteten Elementen Wismut-Silber und besaß einen Gesamtwiderstand von 9Ω . Jedes Element hatte zwei gleich große Empfänger (A und B der Abb. 25) von den Dimensionen $1,5 \times 5$ mm. Der Apparat war leicht zu bedienen, und es konnten entweder beide Empfänger zugleich (Festlegung des Nullpunktes) oder ein Empfänger allein der Strahlung ausgesetzt werden. Zur Prüfung der ABBOT'schen Ergebnisse von 1908 wurde auch mit Vorschaltung einer 1 cm-Glyzerinzelle gearbeitet, die nach Laboratoriumsversuchen von COBLENTZ⁵ eine gleiche Durchlässigkeit wie eine Wasserzelle besitzt. Sollte die Korona tatsächlich eine nennenswerte Infrarotstrahlung emittieren, so mußten sich wesentlich geringere Galvanometerauslässe nach Durchgang der Strahlung durch die Glyzerinzelle ergeben.

Der Beobachtungsvorgang umfaßte vier Serien. Serie Ia) die Empfänger A und B werden auf die dunkle Mondscheibe gerichtet, b) Empfänger A auf Korona-West, B als „kalte“ Lotstelle, c) A und B wieder auf den Mond. Das Ergebnis der ersten Messungsserie beruht auf dem Ausschlag $b = \frac{a+c}{2}$. Bei der Serie II wurde die Glyzerinzelle vorgeschaltet, im übrigen die Beobachtungen der Serie I wiederholt. Serie IIIa und c wie bei I, IIIb nunmehr mit Empfänger B auf Korona-Ost und A als „kalte“ Lotstelle. Serie IV schließlich analog wie Serie III, nur mit dem Unterschied, daß hier wieder die Glyzerinzelle vorgeschaltet wurde.

Es zeigte sich, daß von der Glyzerinzelle nur etwa 33% der Gesamtstrahlung durchgelassen wurden, womit das ABBOT'sche Ergebnis qualitativ bestätigt ist.

¹ Ap J 12, S. 87 (1900)² Smithsonian Ann. 4, S. 3 (1913)³ Nähere Angaben über Thermoelemente siehe Ziff. 2, 29, 30, 32 und 40⁴ Ap J 62, S. 128 (1925)⁵ Bull. Bur. of Stand. 17, S. 272 (1921)

Der Betrag an infraroter Koronastrahlung war sogar noch wesentlich größer. Man konnte dies dadurch erklären, daß bei den älteren Versuchen bereits bei 3μ der Strahlung eine Grenze gesetzt war, hier aber noch weitere langwellige Strahlung hinzugekommen ist. Andererseits muß aber darauf hingewiesen werden, daß die Ergebnisse einer zweiten Sonnenfinsternisexpedition des Jahres 1925, thermoelektrische Untersuchungen von E. PERM und S. B. NICHOLSON¹, das große Übergewicht der infraroten Koronastrahlung nicht bestätigen konnten. Hier wurde an einem 50,5 cm-Spiegel von 101 cm Brennweite (dem umgeschliffenen ALBOISCHEN Spiegel von 1908) ebenfalls mit einem Vakuum-Thermoelement gemessen. Dieses Thermoelement besteht aus zwei Empfängerscheibchen, 5 mm

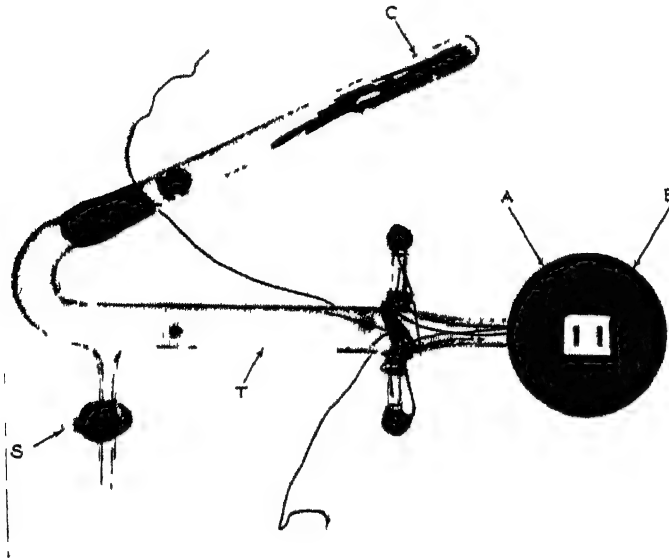


Abb 25 Die von H. I. STERSON und W. W. COBLENTZ bei der Sonnenfinsternis 1925 Januar 24 verwendete Apparatur zur thermoelektrischen Messung der Koronastrahlung. Rechts die Thermosäule mit den beiden gleichdimensionierten Empfängern A und B. S der Stöpselverschluss des evakuierten Glasröhrchens T, links oben Ansatz (C), gefüllt mit metallischem Kalzium. [Ap J 62 (1929)]

voneinander entfernt, eine Distanz, die im vorliegenden Falle dem abgebildeten Mondradius gleichkam. Wurde ein Empfänger auf die Korona 4',6 westlich des Mondrandes gerichtet, so stand der zweite Empfänger auf der dunklen Mondscheibe, 12',4 innerhalb des Randes. Es wurde abwechselnd bei der Stellung „Korona-West“ und „Korona-Ost“ gearbeitet. Um während der Finsternis für alle Fälle die geeignetste Empfindlichkeit der Apparatur zur Verfügung zu haben, wurden praktische Vorkehrungen getroffen. War die Empfindlichkeit zu groß gewesen, so sollten dem zum Galvanometer in Serie geschalteten Stöpselrheostaten Stöpsel entnommen werden, im umgekehrten Falle stand ein zweites Galvanometer von 6mal größerer Empfindlichkeit in Bereitschaft, das rasch in den Stromkreis einzuschalten war. Zur Durchführung einer Vergleichung der Gesamtstrahlung von Korona und Sonne hat man an einem der Finsternis folgenden Tage mit einem Hilfsspiegel bei gleicher Sonnenhöhe thermoelektrische Messungen vorgenommen.

¹ Ap J 62, S 202 (1925)

Um mit Sicherheit die Gesamtstrahlung der Korona bis in das äußerste Infrarot zu erhalten, war das Gehäuse des Thermoelements mit einem Steinsalzfenster versehen. Andererseits wurde, um einzelne Spektralbereiche aussondern zu können, ähnlich wie bei den Planeten-Untersuchungen (s. Ziff 31 und 33), auch mit Absorptionsfiltern gearbeitet. Zur Anwendung gelangte die 1 cm-Wasserzelle, die bereits bei den ersten thermoelektrischen Untersuchungen¹ von 1922 (s. Ziff 33) benutzt wurde. Sie läßt nur mehr wenig Energie über $1,1\mu$ durch und absorbiert Strahlung größer als $1,4\mu$. Daneben wurde die Koronastrahlung auch nach Durchgang durch ein Mikroskopdeckglaschen von 0,165 mm Dicke gemessen. Dieses Filter, das zum ersten Male 1924 bei den thermoelektrischen Untersuchungen der Strahlung des Planeten Mars² Anwendung fand, läßt nur mehr wenig Energie über 4μ durch, Strahlung über 8μ wird bereits völlig absorbiert. Mehrfache Einstellungen der Korona ergaben folgende mittlere Ausschläge: Wasserzelle 47,1, Deckglaschen 61,4 und ohne Filter 65,4. Auffallend ist der geringe Unterschied zwischen der Gesamtstrahlung und der Strahlung nach Passieren des Mikroskopdeckglaschens. Die prozentuale Verteilung der Strahlung bei Korona und Sonne in verschiedenen Spektralbereichen, wie sie sich aus den gewonnenen Ausschlägen errechnen läßt, ersieht man aus nachstehender kleinen Tabelle.

Spektralbereich in μ	0,3 bis 1,3	1,3 bis 5,5	8 bis 14
Korona	77,6%	22,4%	0,0
Sonne	71,4	28,6	0,0

Es zeigt sich demnach, daß die Koronastrahlung im Bereich unter $1,3\mu$ wohl relativ größer als die Sonnenstrahlung, der Unterschied aber nicht bedeutend ist. Zwischen 1,3 und $5,5\mu$ kehrt sich das Verhältnis sogar um, und über 8μ fehlt praktisch jede Strahlung. Die Ergebnisse von PETTIT und NICHOLSON sind demnach mit den früher genannten Ergebnissen nicht vereinbar. Man steht vor der noch ungeklärten Erscheinung, daß bei derselben Finsternis thermoelektrische Messungen der Koronastrahlung mit prinzipiell analoger Apparatur bei der einen Expedition eine Wasserzellentransmission von etwa 33%, bei der anderen von 78% gezeigt haben. Reduziert man auf gleiche Skala, so ist das Verhältnis der beiden Wasserzellenausschläge sogar von der Größenordnung 1:3. Von Interesse ist noch der Versuch, einen Absolutwert der Koronastrahlung anzugeben. Nimmt man zur Zeit der Finsternis die Solarkonstante zu $1,93 \text{ gcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ an, so ergibt sich für die Korona nach den Messungen von PETTIT und NICHOLSON ein Energiewert von $2,14 \cdot 10^6 \text{ gcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, wobei in diese Bestimmung die nicht gesicherte Annahme eingeht, daß der Strahlungsverlust in der Erdatmosphäre für Sonne und Korona gleich groß ist.

Die theoretische Energieverteilung im kontinuierlichen Spektrum der Korona hat J. WOIJER JR.³ unter Annahme der Zerstreuung durch freie Elektronen behandelt und ist zu dem Schluß gekommen, daß die kurzwelligen Strahlen bis in das rote Gebiet in Korona und Sonne übereinstimmen, daß dagegen die infrarote Strahlung in der Korona überwiegt. Im übrigen ist die praktische Übereinstimmung von Korona- und Sonnenspektrum für das Gebiet von $\lambda 3820$ bis $\lambda 4840$ durch die Untersuchungen von H. LUDENDORFF⁴ bereits einwandfrei nachgewiesen und neuerdings von W. GROTRIAN⁵ auch für das Gebiet von $\lambda 3400$ bis $\lambda 6500$ bestätigt worden. Ungeklärt bleiben aber, wie eingangs in dieser Ziffer

¹ Ap J 56, S 295 (1922)² Pop Astr 32, S 601 (1924)³ B A N 3, S 103 (1926)⁴ Beil Ak Ber 1925, S 85⁵ Z f Astrophys 3, S 199 (1931)

nung, mit der die meisten Untersuchungen angestellt wurden, eine kompensierte Vakuumsaule. Erst in letzter Zeit verwendet man bei diesen Arbeiten wieder alte Thermosaulen vom Luftzylentypus. d_1 und d_2 sind die Zuführungsleitungen zu einem empfindlichen Galvanometer. Um eine Spindel Sp als Achse rotiert eine Scheibe Sch , die je zwei symmetrisch angeordnete optische Systeme trägt. Jedes dieser Systeme besteht aus einer kurzbrennweitigen Quarzlinse L (Öffnung $1''$, $f = 2''$) und einer Quarzplatte Pl . An den Innenseiten sind Linse und Platte in dem einen System versilbert (S), im anderen vergoldet (G). Im direkten Kontakte mit der Platte Pl ist an der Außenseite eine kupferne Blende angebracht, die die Öffnung für die Silberlinse auf 8,08 mm, für die Goldlinse auf 9,35 mm herabsetzt. Durch



Abb 27 Die Anordnung des thermoelektrischen Meßapparates am Sechszoller der Mt Wilson-Sternwarte [Ap J 75 (1932)]

Drehung der Scheibe, die mit einem Uhrwerk gekuppelt ist, wird wechselweise das erste oder das zweite System in den Strahlengang Sonne-Thermosaule gebracht. Das Silberfilter läßt Strahlen zwischen λ 3100 und λ 3300 durch, ein sehr spitzes Maximum liegt bei λ 3200. Das Goldfilter ist durchlassig für die Wellenlängen λ 4000 bis λ 6000, ein verhältnismaßig flaches Maximum ergibt sich bei λ 5000. Gemessen wird demnach das Intensitätsverhältnis Ultraviolett Grün, das zu einer Ermittlung der ultravioletten Sonnenstrahlung führen soll.

Die Apparatur wurde bisher auf dem Mt Wilson und in Tucson verwendet. In Abb 27 ersieht man die gewählte Anordnung in Verbindung mit dem sechszölligen Refraktor des Mt Wilson-Observatoriums. In dem geöffneten Gehäuse befindet sich die Thermosaule T , hinter ihr erkennt man die Scheibe, als Träger der beiden optischen Systeme, vor ihr sitzt ein kleines Vergrößerungsglas I , mit dem die richtige Einstellung des „grünen“ Sternbildes auf die Thermosaule kontrolliert wird. Der Motor M mit der Friktionsscheibe D betreibt die Spindel, an deren unterem Ende die Hemmung E ersichtlich ist. Diese wird in Intervallen von

1 Minute mittels eines Magneten automatisch gelöst. Die mit C bezeichneten Kabelschnüre verbinden einerseits die Hemmungsmagneten mit der Kontaktuhr, andererseits die Thermosaule mit dem Galvanometer. Auf der Polarachse des Sechszollers ist schließlich parallel mit dem Stundenkreise ein Zahnrad *W* montiert, das mit der photographischen Registriervorrichtung in Verbindung steht. Die Anordnung ist derart reguliert, daß die Platte in der Stunde um 27 mm vorrückt. Es können die Beobachtungen eines neunstündigen Zeitintervalles, das sind 135 Intensitätsmessungen des Energieverhältnisses UV/Grun von je 4^m Dauer, auf einer einzigen Platte des gewählten Formates registriert werden.

24 Methoden zur Reduktion der Beobachtungen Aus den Registrierkurven werden die einzelnen Beobachtungen graphisch ausgeweitet und die Logarithmen des Intensitätsverhältnisses UV/Grun sodann in einem Diagramm als Ordinaten, die Luftmassen $m = \sec z$ als Abszissen aufgetragen. Die so gewonnenen Punkte lassen sich durch eine Gerade darstellen. Es wird nun angenommen, daß dieselbe Beziehung zwischen m und UV/Grun auch für die nichtbeobachteten Luftmassen, also auch für $m = 1$ und $m = 0$ gelte. PETTIT bestimmt demnach aus der Lage der Schnittpunkte der extrapolierten Geraden mit den Ordinaten die entsprechenden Werte des Intensitätsverhältnisses. Die Schwankungen des Intensitätsverhältnisses UV/Grun werden unter der Annahme, daß sich die Intensität für Grun nicht ändere, als reelle Schwankungen der ultravioletten Sonnenstrahlung angesehen. Es entsteht nun die Frage, ob bei dieser Reduktionsmethode tatsächlich eine zuverlässige Extrapolation auf Luftmasse 0 vorgenommen wird, um so mehr, als es sich herausstellte, daß die mit der PETTITSchen Apparatur ermittelte kraftige Schwankung der kurzwelligen Sonnenstrahlung in gleicher Weise zum Vorschein kommt, wenn bis Luftmasse 1 oder Luftmasse 0 extrapoliert wird. Nach mehrfachen Untersuchungen von W E BERNHEIMER¹ scheint es sich jedoch im wesentlichen nicht um Schwankungen der extraterrestrischen Sonnenstrahlung handeln zu können, zumal in den veröffentlichten Daten ein ausgeprägter jährlicher Gang nachzuweisen war. In einer vor kurzem erschienenen ausführlichen Arbeit wird von PETTIT² die Möglichkeit störender Effekte in den Ergebnissen zugegeben. Zwecks Diskussion des atmosphärischen Einflusses leitet er für jeden Monat des Zeitraums 1925 bis 1931 das Verhältnis

$$\frac{(UV/Grun)_{m_1}}{(UV/Grun)_{m_0}}$$

ab. Merkwürdigerweise bleibt nun dieses Verhältnis praktisch immer unverändert. Es treten nur ganz geringfügige Schwankungen auf, die jedoch keine Beziehung mit dem Gange der endgültigen Daten der extraterrestrischen Ultraviolett-Strahlung nachweisen. Die Konstanz des Verhältnisses wird von PETTIT als Beweis für eine verhältnismäßig gute Elimination des atmosphärischen Einflusses angesehen. Dieser Schluß ist aber wohl nur dann zulässig, wenn die berechneten Werte für $m = 0$ tatsächlich extraterrestrisch sind. Das ist aber schwer denkbar, da den Angaben der Beobachter zufolge die extrapolierten extraterrestrischen Strahlungswerte selbst bei Zirkus und Dunst ungestört bleiben. Nur bei den Nachmittagsmessungen, die für die endgültigen Daten ausgeschlossen wurden, ist nach PETTIT eine Verfälschung durch Talnebel eingetreten. Immerhin ist auch nach neuen Untersuchungen von BERNHEIMER (unveröffentlicht), die nunmehr Daten von 1907 Tagen aus dem Zeitraum 1925 April bis 1933 Juni

¹ Naturwiss 16, S 526 (1928), ds Handb IV, Kap 1 (1929), M Weather Rev 57, S 412 (1930) Meteor Z 47, S 190 (1930), Lund Obs Circ Nr 2 (1931), Comm Solar and Terr Relationships III Report, S 16 (1931)

² Ap J 75, S 185 (1932)

umfassen, der jährliche Gang unverändert festgestellt worden. Die beobachteten Schwankungen der ultravioletten Sonnenstrahlung, die im Falle ihrer extraterrestrischen Realität entweder Temperaturschwankungen der Sonne von etwa 1000° oder kraftige Intensitätsschwankungen der Absorptionsbande bei $\lambda 3200$ andeuten mußten, sind also offenbar im wesentlichen durch Vorgänge in der Erdatmosphäre bedingt. Es ist nicht anzunehmen, daß entscheidende instrumentelle Fehler vorliegen, dagegen ist zu erwarten, daß eine Verbesserung der Reduktionsmethoden, die etwa nach Art der kurzen Methoden der Smithsonian-Beobachter (s. Ziff 17) eine schärfere Erfassung des jeweiligen Luftzustandes ermöglichen, zum erwünschten Ziele führen werden. Vor allem sollten nach einem Vorschlag von BERNHEIMER gleichzeitige Beobachtungen auf der nördlichen und der südlichen Halbkugel vorgenommen werden. G. ABERTI, der sich den von BERNHEIMER vorgebrachten Argumenten anschließt, schlägt neuerdings vor¹, das Problem durch spezielle UV-Spektrographen anzugehen und mit ihrer Hilfe, bei gleichzeitigem Anschluß an künstliche Lichtquellen, monochromatische Strahlungskurven in mehreren Spektralbezirken, abzuleiten. Nach einem Berichte von J. DUFAY² sind derartige Prüfungsversuche der amerikanischen Ergebnisse in Lyon begonnen worden.

25 Das Meßverfahren von W W COBLENTZ und R STAIR Neben den in voriger Ziffer angeführten Untersuchungen von PETTIT ist nunmehr auch von anderer Seite beabsichtigt, Messungen der ultravioletten Sonnenstrahlung mit Thermoelementen vorzunehmen, Ergebnisse sind jedoch bisher noch nicht bekanntgeworden. W W COBLENTZ und R STAIR³ haben sich die Aufgabe gestellt, die kurzwelligste Sonnenstrahlung unterhalb von $\lambda 3130$ zu messen. Das Verfahren beruht auf einer Filtermethode in Verbindung mit thermoelektrischen Apparaturen. In ähnlicher Weise wie bei den Untersuchungen von PETTIT wird auf eine Vakuum-Thermosaule Verzicht geleistet und ein nichtselektives Thermoelement der Kombination Kupfer-Konstantan in Luft verwendet. Zur Ausschaltung des sichtbaren und infraroten Spektralgebietes wird in den Strahlengang eine Quarzplatte mit einer Wasserschicht von 1 cm Dicke sowie ein Spezialfilter (Corning-Glasfilter G 985 A) eingesetzt. Das optische System ist dann von maximaler Durchlässigkeit für den Bereich von $\lambda 2500$ bis $\lambda 4400$. Nach erfolgter Beobachtung in dieser Anordnung wird eine neuerliche Messung vorgenommen, diesmal jedoch nach Vorschalten von Barium-Flintglasplatten, die ausschließlich Strahlung oberhalb der Wellenlänge $\lambda 3130$ durchlassen. Es besteht auf diese Weise keine Schwierigkeit, die gesuchte Strahlungsenergie im kurzwelligsten Bereiche unter $\lambda 3130$ rechnerisch abzuleiten. Sie ergibt sich aus den Differenzen der Galvanometerausläge, wie sie ohne und mit den Barium-Flintfiltern beobachtet wurden. Es wäre von großem Interesse, wenn Messungen mit diesem Apparat, bei dem eine Genauigkeit von 1% unschwer zu erzielen ist, gleichzeitig mit Beobachtungen nach der PETTITSchen Anordnung vorgenommen würden, einerseits zur gegenseitigen Kontrolle, andererseits aber vor allem aus dem Grunde, weil vermutete Schwankungen der Sonnenstrahlung in dem von COBLENTZ und STAIR erfaßten Spektralgebiete wohl noch größere Amplituden zeigen mußten, als in dem mit dem Silberfilter beobachteten Gebiete PETTITS.

26 PETTITS Meßanordnung zur Bestimmung der spektralen Energieverteilung Neuerdings haben Thermoelemente in Verbindung mit einem Monochromator auch bei der Bestimmung der Energieverteilung im kurzwelligen Sonnenspektrum Verwendung gefunden. Hinsichtlich des Monochromators ist

¹ Comm. Solar and Terr. Relationships, III. Report, S. 5 (1931)

² Comité Nat. Franç. d'Astr., Congrès Nat. d'Astr., Juli 1931, S. 52 (1931)

³ Bur. of Stand. J. of Res. 6, S. 951 (1931)

folgende Erwägung maßgebend. Die in Ziff 14 dargelegte Methode ABBOTS zur spektrobolometrischen Messung der Energieverteilung im gesamten Sonnenspektrum arbeitet mit unveränderten Spaltbreiten des Monochromators im ganzen Bereiche. Erst nachträglich wird die Korrektion für die veränderliche Dispersion an die Ergebnisse angebracht und sodann das prismatische Spektrum des Bologramms auf das normale Spektrum reduziert. Der Vorteil der Methode liegt darin, daß etwaige durch Veränderung der Spaltbreite während der Messung auftretende Fehler ausgeschlossen werden, andererseits darf aber nicht außer acht gelassen werden, daß die Dispersionskorrekturen, vor allem im Ultra violetten, derart anwachsen, daß die Endergebnisse ernstlich gefährdet werden. Dieser Nachteil hat sich, wie in Ziff 35 noch dargelegt werden wird, bei den

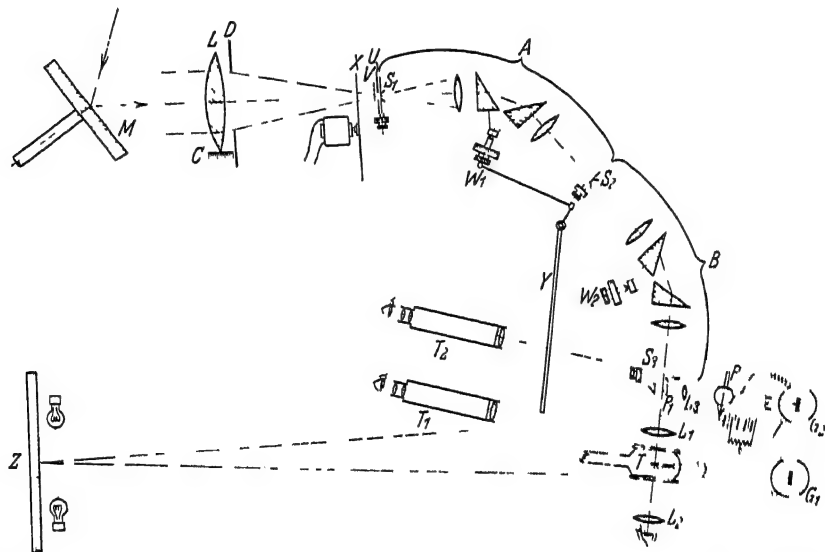


Abb 28 Quarz-Doppelmonochromator mit Thermosaule und Photozelle zur Messung der Energieverteilung im kurzwelligen Sonnenspektrum. Schematische Skizze der 1931 von E. PETERLIN in Tucson, Arizona, verwendeten Apparatur [Ap J 75 (1932)]

mit Hilfe des Spektrobolometers vorgenommenen Energiemessungen in den Fixsternspektren ungemein störend ausgewirkt.

Bei den Sonnenuntersuchungen im kurzwelligen Spektralbereich, die 1931 mit Doppelmonochromator und Thermoelement, bzw. Photozelle, von E. PETERLIN¹ in Tucson, Arizona, vorgenommen wurden, ließ man den ersten Spalt des Monochromators im allgemeinen unverändert, dagegen veränderte man den zweiten entsprechend der Dispersion. Bei einigen wenigen Versuchen wurde sogar auch die Konstanz der Breite des ersten Spaltes aufgegeben.

Die Messungen erfolgten mit einer Vakuum-Thermosaule I von vier Elementen der Kombination Wismut — Wismut + 5% Zinn (vgl. Ziff 30 u. 32). Die Ausschläge des dazugehörigen Galvanometers G_1 wurden mit dem Ablesefernrohr T_1 und der Skala z beobachtet (s. Abb 28). Für die kürzesten Wellenlängen konnte man die Thermosaule durch eine Na-Photozelle aus Quarz (Maximalempfindlichkeit bei λ 3200) ersetzen, die einfach durch Vorschalten des kleinen Quarzprismas P_1 bzw. der Quarzlinse L_3 in den Strahlengang gebracht wurde.

¹ Ap J 75, S 204 (1932)

Die entsprechenden Ausschläge des Galvanometers G_2 wurden dann an derselben Skala z mit dem Ablesefernrohr T_2 beobachtet. Die Photozelle bewirkte einen Ausschlag von 700 mm, wenn die Thermosaule einen solchen von 30 mm ergab.

Bei den Messungen des totalen kurzwelligen Sonnenlichtes befand sich im Strahlengang zwischen dem Stelltsiderostaten M und dem ersten Spalt S_1 des ersten Monochromators nur ein vierzelliges Diaphragma, bei den Messungen der Strahlung aus dem Zentrum der Sonnenscheibe allein wurde dagegen die in Abb. 28 wiedergegebene Anordnung eingeschaltet. Sie besteht aus einer zwölffelligen Quarzlinse L und einem Diaphragma D und besitzt noch eine bei C angeordnete Fokussierungsskala sowie einen rotierenden Sektor X zur wahlweisen Herabsetzung der Galvanometeraussschläge auf ein Zehntel des ursprünglichen Wertes. Die beiden Monochromatoren A und B sind in gleicher Weise gebaut. Der gerade Spalt S_2 , der beiden gemeinsam ist, bildet den Ausgangsspalt von A und den Eingangsspalt von B . S_1 ist der Eingangsspalt von A und S_3 der Ausgangsspalt von B , welche beide gekrümmt sind. Jeder Monochromator enthält zwei Quarzlinsen und zwei 30° -Quarzprismen. Um beim Eingang von A die Erwärmung des Spaltes S_1 herabzusetzen, ist hier noch ein breiter Spalt U angebracht, der durch den Verschuß V betätigt wird. W_1 und W_2 sind Mikrometerschrauben zur Orientierung der Prismensätze. Die Energieverteilung wurde im Bereich von λ 7000 bis λ 2900 bei 22 verschiedenen Einstellungen gemessen, wobei 12 Stellen auch mit der Photozelle registriert wurden. Zur Festlegung der gesamten Energiekurve benötigte man rund eine Stunde.

Bei der Reduktion der Messungen waren die Reflexion des Siderostaten, die Durchlassigkeit des Monochromators und die atmosphärische Transmission zu berücksichtigen. Arbeitete man mit Thermosaule, so war auch noch der Strahlungsverlust durch die Linse L_1 , bei den Messungen der zentralen Sonnenintensität überdies auch jener durch die Linse L zu berücksichtigen. Die Bestimmung der atmosphärischen Transmission erfolgte auf folgende Weise: Aus einem Diagramm mit dem jeder Wellenlänge entsprechenden Logarithmus der Galvanometeraussschläge und $\sec z$ als Koordinaten wurden die zu Luftmasse 1 und 0 gehörenden Werte extrapoliert und die Differenz der Werte für $m = 1$ und $m = 0$ als Logarithmus der atmosphärischen Transmission ($\log Tr$) angesehen. Die Beobachtungen eines jeden Tages wurden dann mit Hilfe dieses Wertes $\log Tr$ sowohl auf Luftmasse 1 wie 0 zufolge nachstehender Beziehungen der BOUGUËRESCHEN Theorie reduziert:

$$\log d_0 = \log d - \sec z \log Tr,$$

$$\log d_z = \log d_0 + \log Tr,$$

wobei d den bei der Luftmasse $\sec z$ durchschnittlich beobachteten Galvanometerausschlag, Tr den oben ermittelten Wert der atmosphärischen Transmission, d_z und d_0 die aus der Extrapolation folgenden Galvanometerausschläge für Luftmasse 1 und 0 darstellen. Es erübrigt sich dann noch, d_z und d_0 um die Summe der bereits genannten Beträge des Strahlungsverlustes in den einzelnen Teilen der Apparatur zu korrigieren.

Beobachtungen sind nur an 8 Tagen erhalten worden. Man kann daher die Ergebnisse, wie kraftiger Abfall der Energiekurve bei λ 4000 und λ 3200 und ungefähre Konstanz zwischen λ 3900 und λ 3200 kaum als endgültig ansehen, um so mehr, als die Berücksichtigung des Strahlungsverlustes in Apparatur und Atmosphäre nicht genügend streng erfolgt ist. Bedenken in dieser Richtung sind u. a. von R. WUDD¹ vorgebracht worden, der speziell auf die im übrigen auch

¹ Himmelswelt 32, S. 204 (1932)

von PIRRI¹ selbst bemerkte Unstimmigkeit hinweist, daß die zentrale Sonnenenergie im ultravioletten Gebiete wesentlich geringer erscheint, als die Energie der totalen Sonnenscheibe. Dies steht mit allen bisherigen Erfahrungen in Widerspruch. Ob dieses Ergebnis durch eine fehlerhafte Ermittlung des Strahlungsverlustes der Quarzlinse *L* verursacht ist, oder ob andere instrumentelle Fehlerquellen vorliegen, wird erst bei zukünftigen Neubestimmungen festzustellen sein, diese mußten dann unbedingt auch auf ein größeres Material gegründet sein und hatten vor allem die Extinktionswirkung in der Erdatmosphäre scharf zu erfassen.

1) Methoden und Instrumente zur Messung der Gesamtstrahlung der Planeten und Fixsterne mit Thermoelementen und Radiometern

27 Historische Untersuchungen Die Untersuchungen über die Wärmestrahlung der Sonne gehen, wie in Ziff 11 auseinandergesetzt, bis zu den 1800 von W. HERSCHEL² vorgenommenen Versuchen zurück, die bolometrischen Meßmethoden sind im wesentlichen bereits 1882 von S. P. LANGLEY³ entwickelt worden.

Dagegen verzeichnen wir den ersten Versuch, die Gesamtstrahlung eines Planeten zu bestimmen, nicht früher als 1913. Es handelt sich hier um die thermoelektrischen Experimente von A. H. PFUND⁴ auf der Allegheny-Sternwarte (s. Ziff 29). Systematische Arbeiten über die Gesamtstrahlung der Planeten hat W. W. COBLENTZ nach erfolgversprechenden Vorversuchen im Jahre 1914⁵ ab 1922⁶ veröffentlicht (s. Ziff 31), über die Mt. Wilson-Untersuchungen von PIRRI und S. B. NICHOLSON erfolgte die erste Mitteilung 1923 beim 13. Meeting der Am. Astr. Soc.⁷

Wesentlich weiter zurück als die Messungen der Wärmestrahlung der Planeten liegen die ersten Versuche, die die Fixsterne als Objekt haben. Bereits 1868⁸ verwendet W. HUGGINS Thermoelemente. Er arbeitet an einem 8-Zoller und benutzt zwei Paare von Thermoelementen der Kombination Bi-Sb. Nach 4 bis 5 Minuten Exposition erzielt er Ausschläge bei Arktur, Pollux, Regulus und Sirius. Bald darauf stellt E. J. STONE⁹ mit Thermoelementen an einem Refraktor von 12 3/4 Zoll Öffnung das Verhältnis der Wärmestrahlung Arktur/Wega zu 3/2 fest. Wenn auch dieses Ergebnis der Größenordnung nach richtig ist, so ist zu bedenken, daß die STONEsche Apparatur außerordentlich primitiv war, da für einen einzigen Ausschlag 10 Minuten lang exponiert wurde. Wie wir heute rückblickend erkennen müssen, sind sowohl die Versuche von HUGGINS als auch die von STONE mit völligen untauglichen Mitteln erfolgt und die damals vermuteten Ergebnisse nicht als reell anzusehen. Bis 1890 sind neuere Versuche nicht mehr vorhanden, abgesehen von den ganz unwahrscheinlichen Angaben von T. A. EDISON, 1878 mit seinem „Mikro-Tasimeter“¹⁰, in Verbindung mit einem 4-Zoller, Galvanometeraussschläge von α Boo erhalten zu haben¹¹. 1890 veröffentlichte C. V. BOYS¹² seine an einem 16-zölligen Spiegel vorgenommenen

¹ Ap J 75, S 218 (1932)

² Phil Trans London 90, S 284 (1800)

³ C R 95, S 482 (1882)

⁴ Publ Allegheny 3, S 13 (1913)

⁵ Lick Bull 8, S 104 (1915), Sc Pap Bur of Stand 1914, Nr 244

⁶ Erste Mitteilung Oktober 1922 beim Meeting der Opt Soc Am, veröffentlicht in Pop Astr 31, S 105 (1923)

⁷ Pop Astr 31, S 657 (1923)

⁸ London R S Proc 17, S 500 (1868/69)

⁹ London R S Proc 18, S 159 (1869/70)

¹⁰ Chem News 28 (1878)

¹¹ Use of the Tasimeter for Measurement of the Heat of Stars and of the Sun's Corona, Amer J Sci 67, S 52 (1879)

¹² London R S Proc 47, S 480 (1890)

Untersuchungen mit einem von ihm konstruierten sog Radiomikrometer¹ Der Empfänger hatte eine Oberfläche von 4 mm², die Aufhängevorrichtung bestand in einem Quarzfaden Die Schwingungsperiode betrug 10 Sekunden Über die Empfindlichkeit seiner Apparaturen macht Boys folgende Angaben Ohne Fernrohr wurde durch eine Kerze in 152 cm Entfernung ein Ausschlag von 60 mm erzielt, in Verbindung mit dem genannten Spiegelteleskop bewirkte eine Kerze in einer Distanz von 250,7 Yard bei trockener Witterung einen Ausschlag von 38 mm Boys berechnete, daß durch seine instrumentelle Anordnung $1,5 \cdot 10^{-5}$ der Wärmestrahlung des Vollmondes erlaßt werden konnte Bei seinen Versuchen soll sich bei der Venus ein meßbarer Ausschlag ergeben haben, Versuche bei Jupiter, Saturn, α Boo, α Lyr, α Aur und α Aql sind negativ ausgefallen Da zweifellos das Radiomikrometer von Boys den von HUGGINS und STONE verwendeten thermoelektrischen Meßapparaten an Empfindlichkeit überlegen war, so müssen wohl die von HUGGINS und STONE veröffentlichten Ergebnisse auf sekundären Effekten innerhalb der Apparatur beruhen und können nicht als reelle, extraterrestrische Strahlungsmessungen angesehen werden Dieser Verdacht wurde schon von Boys geltend gemacht und durch die späteren Arbeiten von E F NICHOLS² (Ziff 28) bekräftigt Auf Grund moderner Erfahrungen muß man die Arbeiten von Boys als die ersten astrophysikalischen Wärmestrahlungsmessungen bezeichnen, wobei aber auch hier nicht mit voller Sicherheit angegeben werden kann, ob der beobachtete Ausschlag bei Venus als reell anzusehen ist

Das Radiomikrometer ist von äußeren magnetischen Einflüssen frei und verdient daher große Beachtung Wenn auch späterhin W W COBLENTZ eine Neukonstruktion³ dieses Meßinstrumentes entwickelte, so sind doch astrophysikalische Anwendungen, soweit bekannt, nicht mehr vorgenommen worden Der Grund dürfte darin bestehen, daß die Thermoelemente dem Radiomikrometer an Empfindlichkeit überlegen sind, obwohl es neuerdings, wie etwa durch das Radiomikrometer von H WILF⁴, gelungen ist, gegenüber dem Boysschen Instrument eine ganz wesentliche Empfindlichkeitssteigerung zu erzielen So ist es durch eine nennenswerte Verringerung der Dimensionen von Drahtschleife und Spiegelchen mit dem WILFschen Apparate bei einer Normalkerze als Lichtquelle und einem Skalenabstand von einem Meter möglich, noch einen Ausschlag von 500 mm zu erreichen

28 Die Radiometermessungen von E F NICHOLS Das von E F NICHOLS⁵ konstruierte Torsionsradiometer, eine Verbesserung der CROOKESSchen Lichtmühle⁶, ermöglichte, erstlich an astrophysikalische Strahlungsmessungen heranzugehen Die Versuche erfolgten 1898 und mit verbesserter Anordnung 1900 auf der Yerkes Sternwarte durch NICHOLS mit Unterstützung von A L COLTON und C F ST JOHN⁷ Das Radiometer hatte geschwarzte Flügel von 2 mm Durchmesser, der Abstand der Mittelpunkte betrug 4,5 mm Die Flügel waren mittels eines feinen, 32 mm langen Quarzfadens, der in einem Stahldraht endigte, in die Aufhängevorrichtung eingelassen Die Schwingungsperiode betrug 10 bis 11 Sekunden, bei der verbesserten Konstruktion von 1900 13 Sekunden Der maximale Effekt wurde in 5 bis 7 Sekunden erreicht Das Radiometer ruht wie üblich

¹ London RS Proc 42, S 189 (1887) Das Radiomikrometer ist unabhängig von Boys auch von D'ARSONVAL (Soc Franç de Phys 1886, S 30 u 77) erfunden worden

² Ap J 15, S 101 (1901)

³ Bull Bur of Stand 2, S 179 (1906), 7, S 243 (1911)

⁴ Phys Z 21, S 311 (1920)

⁵ Beschrieben in Wied Ann 60, S 401 (1897), Phys Rev 4, S 297 (1897)

⁶ London RS Proc 22, S 32 u 373 (1874), 24, S 276 (1876) 25, S 304 (1877) 28 S 29 (1877) Die Radiometerliteratur bis zu den Arbeiten von NICHOLS (110 Hinweise) findet sich in Winkelmanns Handb der Phys 2, S 262 (1896)

in einem möglichst luftdicht gehaltenen Behälter. Die Strahlung fällt durch ein Flußspatfenster auf den Empfänger. Die günstigste Wirkungsweise ergab sich mit einer Anordnung, bei der der Abstand zwischen Flugeln und Fenster 2,5 bis 3 mm betrug. Es ist zu beachten, daß die selektive Absorption des Flußspatfensters streng in Rechnung zu ziehen gewesen wäre. Jedenfalls dürfte bei der NICHOLSSchen Apparatur Strahlung über $\lambda 8000$ zum größten Teile, über $\lambda 9400$ vollständig vom Flußspatfenster absorbiert worden sein.

Bei den in Verbindung mit einem 61 cm-Spiegel vorgenommenen Versuchen arbeiteten zwei Beobachter. Der eine notierte am Ablesefernrohr die Ausschläge, der andere pointierte mit Hilfe der Feinbewegung eines Heliostaten den Stein auf einem Flügel des Radiometers. Es wurden zweierlei Ausschläge gemessen: einerseits die bei der Belichtung erfolgten, andererseits solche, die sich bei der Verdunkelung des Flügels ergaben. Die kombinierten Mittelwerte wurden dann für die Ergebnisse herangezogen. Die Empfindlichkeit des Radiometers kann folgendermaßen charakterisiert werden: Ohne Spiegel erzielte eine Meterkerze einen Ausschlag von $5,2 \cdot 10^2$ mm, demzufolge mit dem Spiegel theoretisch einen Ausschlag von $5 \cdot 10^7$ mm. Dies gilt für die Anordnung von 1898. Bei den Versuchen des Jahres 1900 erhöhte sich der Ausschlag auf $7,2 \cdot 10^2$ bzw. auf $6,87 \cdot 10^7$ mm. Die NICHOLSSche Apparatur war 10mal empfindlicher als jene von BOYS. Berücksichtigt man noch die von beiden verwendeten Spiegel, so steigt das Verhältnis auf rund 26:1.

Folgende numerischen Ergebnisse¹ NICHOLS' seien hervorgehoben. α Boo gab einen Ausschlag, der der Warmestrahlung von $1 \cdot 10^8$ Meterkerzen entspricht. Die Warmestrahlung von α Lyr war rund 50% geringer. In beiden Fällen ist eine Berücksichtigung der Extinktion in der Erdatmosphäre nicht erfolgt. Bei den Untersuchungen von 1900 ist der Versuch einer Zenitreduktion gemacht worden, die nach mannigfachen Diskussionen schließlich auf eine Anwendung der visuellen Tabelle G MULLERS² hinausläuft. Immerhin verdienen die Endergebnisse NICHOLS auch heute noch ein gewisses Interesse. Bezeichnet man die radiometrisch gemessene Energie von Wega mit 1,0, so findet man für Saturn 0,74, für Arktur 2,2 und schließlich für Jupiter 4,7. Bemerkenswerterweise³ wird die gegenüber Wega mehr als doppelt so große Warmestrahlung von Arktur dahin gedeutet, daß der Arktur zwar eine geringere Photosphärentemperatur besitze, jedoch „may be of sufficiently greater angular diameter, to equal Vega in light and surpass it in total intensity“.

29 Die Untersuchungen von A. H. PFUND. Angeregt durch die von NICHOLS (s. Ziff 28) mit einem Radiometer erhaltenen Messungsergebnisse, wurden im Jahre 1913 von A. H. PFUND⁴ an dem 30zölligen Spiegel des Allegheny-Observatoriums neue Strahlungsmessungen vorgenommen. Für das Gelingen der Versuche war der Umstand ausschlaggebend, daß PFUND ein neues Thermoelement entwickelt hatte, das dem Radiometer NICHOLS' nahezu gleichwertig war. Reduziert man die gewonnenen Ausschläge auf gleiche Spiegelöffnungen, so war die PFUNDSche Anordnung der Apparatur NICHOLS' etwa dreifach überlegen. Die Messungen am Himmel wurden nur kurze Zeit hindurch vorgenommen. Beobachtungsergebnisse sind nur für eine einzige Nacht (1913 September 22) veröffentlicht worden, in der Jupiter, Wega und Atair gemessen wurden.

Das Thermoelement wurde, wie erwähnt, von PFUND selbst konstruiert und stellt einen wesentlichen Fortschritt gegenüber älteren Typen dar. In Abb 29 bedeuten A und B die beiden geschwarzten Empfängerscheibchen des Vakuum-

¹ Ap J 13 S 101 (1901)

² Photometrie der Gestirne Leipzig 1897

³ In Anbetracht des Veröffentlichungsjahres 1901

⁴ Publ Allegheny 3, S 43 (1913)

Thermoelementes, die abwechselnd als „warme“ und „kalte“ Lotstelle wirken (s. Ziff 2). Ihre Fläche beträgt $1,1 \text{ mm}^2$, der gegenseitige Abstand 4 mm . Die Streifen 1 und 2' sind Wismut- und Zinklegierungen, 1' und 2 Wismut- und Antimonlegierungen. Es liegt hier eine Kompensationsanordnung vor. Sowohl der Empfänger A wie B besteht aus zwei gegeneinander isolierten Teilen. Jede thermische Veränderung der Umgebung beeinflusst die beiden Systeme in gleicher Weise und wird derart unwirksam. Das Gleichgewicht kann ausschließlich nur durch die Sternstrahlung gestört werden, die auf ein einziges System geleitet wird. Eine Neukonstruktion desselben Autors¹, die jedoch bei den astrophysikalischen Versuchen noch nicht zur Verwendung gelangt ist, verbessert die Kompensation dadurch, daß die Empfängerseibchen einander noch mehr genähert werden. Bei diesem Thermoelement beträgt der Zwischenraum nur mehr $\frac{1}{2} \text{ mm}$. [Vgl. diesbezüglich die ähnliche Anordnung bei COBLENTZ (Ziff 30)]

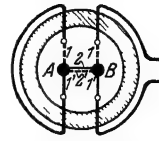


Abb 29 Schematische Skizze des thermoelektrischen Empfängers von A H PFUND (1913) [Publ. Allegh. Obs. 3 (1916)]

Das Galvanometer vom d'Aisonval-Typus war in einem Nebenraum auf einem erschütterungsfreien Pfeiler aufgestellt. Die Spiegelablesung konnte noch bei 5 m Distanz vorgenommen werden, in welchem Falle die Empfindlichkeit $6 \cdot 10^{-9} \text{ Amp/mm}$ betrug. Am Spiegelteleskop erfolgte folgende Anordnung. Im Cassegrain-Fokus wurde die Messingrohre A der Apparatur (Abb 30) eingeschoben. Der thermoelektrische Empfänger ist in der Hülle B eingeschlossen, die bei C mit dem Rohre A verbunden ist. Die zu messende Sternstrahlung fällt durch ein Flußspatfenster F auf das Thermoelement. Die Einstellung läßt sich mittels des Okulars E durch das Fenster G kontrollieren. Der Evakuator H steht, wie aus der Abbildung ersichtlich, mit dem Gehäuse B an der unteren Seite in Verbindung. Von den Klemmschrauben P führen die Leitungen zum Galvanometer.

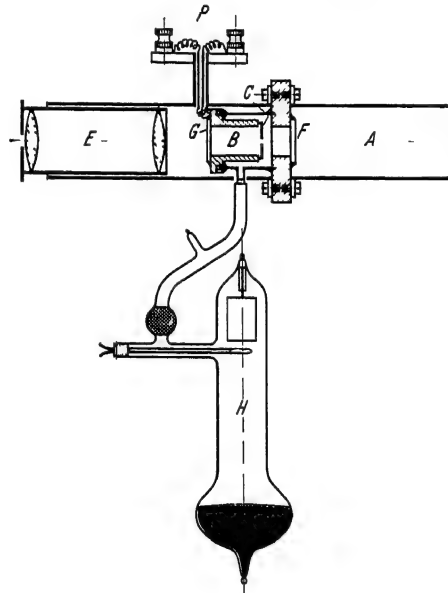


Abb 30 Schematisches Bild der thermoelektrischen Anordnung bei den Versuchen von A H PFUND auf der Allegheny-Sternwarte [Publ. Allegh. Obs. 3 (1916)]

Der Beobachtungsvorgang spielt sich folgendermaßen ab. Die Apparatur wird so lange gedreht, bis die Deklinationsrichtung mit der Verbindungslinie der Empfängerseibchen übereinstimmt. Es wird dann das Sternbild auf den einen der Empfänger geleitet und der Beobachter am Galvanometer durch ein Signal avisiert. Nach erfolgter Ablesung vollzieht sich die Messung am zweiten Empfänger. Der Wechsel kann in einer Sekunde bewerkstelligt werden, bis zur Ablesung des Galvanometerausschlages ließ man aber 20 Sekunden verstreichen. Die nächste Ablesung folgte mit Empfängerwechsel in der umgekehrten Reihenfolge. Die

¹ Phys. Z. 13, S. 870 (1912)

größte Abweichung in den Messungen erreichte etwa 10% des Mittelwertes. Die PFUNDsche Apparatur erzielte bei Wega einen Ausschlag von 7,5, bei Atair von 2,0 mm. Das Ergebnis bei Jupiter (Ausschlag von 3,0 mm) ist wohl bedeutungslos, da die Jupiterscheibe mit $8,4 \text{ mm}^2$ wesentlich größer war als das Empfängerscheibchen von $1,1 \text{ mm}^2$. Der eigentlich nahehegende Versuch, die Vorteile des kleinen Empfängers auszunutzen und mit ihm verschiedene Regionen der Planetenoberfläche abzutasten, ist von PFUND nicht vorgenommen worden. Man findet diesen Gedanken und zugleich die erfolgreiche praktische Durchführung erst bei den Untersuchungen von W W COBLENTZ (Ziff 30 und 31).

30 Die thermoelektrischen Meßinstrumente von W W COBLENTZ Die Anwendung der Thermoelemente bei den Strahlungsmessungen der Planeten und

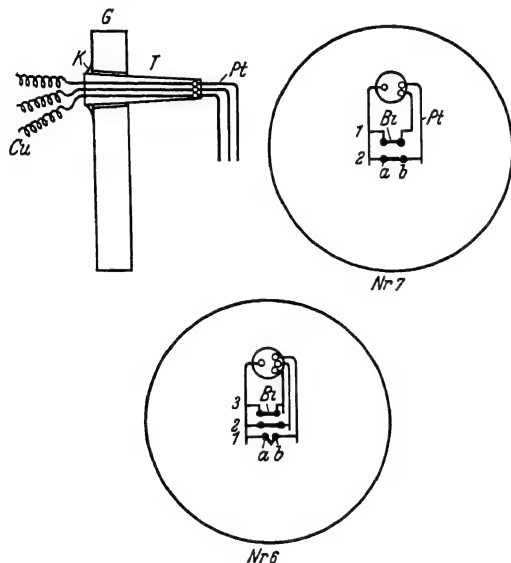


Abb 31 Zwei Typen der von W W COBLENTZ verwendeten thermoelektrischen Meßkörper Nr 7 mit zwei, Nr 6 mit drei Thermoelementen. Die schematische Skizze links oben zeigt die Einführung der Zuleitungsdrähte in das Innere des Meßkörpers [Lick Bull 8 (1915)]

eigentliche Empfängerscheibchen aufgelötet. Es bestand aus einer flachgepreßten Zinnkugel und hatte einen Durchmesser von 1 mm. Wie Laboratoriumsversuche ergaben, war diese vorläufige Anordnung der PFUNDschen Apparatur bereits etwa 5fach überlegen. In der Absicht, die Empfindlichkeit noch wesentlich zu steigern, ist COBLENTZ von dieser Konstruktion bald abgekommen. Es erwies sich praktischer, an Stelle einer Thermosaule nur ein einziges Element zu verwenden, das jedoch zur Herabsetzung der Wärmekapazität aus Drahten größtmöglicher Feinheit bestehen sollte. COBLENTZ hatte nämlich erkannt⁴, daß geringe Wärmekapazität und geringe Wärmeleitfähigkeit für die Empfindlichkeit des Elementes ausschlaggebend sind, als eine hohe thermo-

Fixsterne hat zu wesentlichen Erfolgen erst durch die Arbeiten von W W COBLENTZ und seiner Mitarbeiter geführt, die auf der Lick- und später auf der Lowell-Sternwarte vorgenommen wurden. Gleichwertige Ergebnisse mit zum Teil ähnlicher Apparatur erzielten dann auch E PETTIT und S B NICHOLSON (Ziff 32 und 33) auf dem Mt Wilson.

Die Vorversuche von COBLENTZ zur Entwicklung wirksamer, für astrophysikalische Zwecke geeigneter Thermoelemente reichen noch weiter zurück als die Arbeiten von A H PFUND (Ziff 29). Bereits 1911 erfolgten Mitteilungen diesbezüglicher Ergebnisse¹. Weitere technische Angaben werden in den Jahren 1914 bis 1921 veröffentlicht². Der Meßapparat von 1911³ arbeitete mit einer Thermosaule von zehn Elementen der Kombination Bi-Ag, die in einem Punkte zusammenhingen. Hier war das

¹ Bull Bur of Stand 9, S 30 (1911)

² Siehe besonders Bull Bur of Stand 11, S 131 (1914), 13, S 423 (1916), 14, S 507 (1918), 17, S 8 (1920), J Opt Soc Amer 5, S 131 (1921)

³ Bull Bur of Stand 9 S 30 (1911), Pop Astr 21, S 105 (1923)

⁴ Bull Bur of Stand 11, S 131 (1914)

elektrische Kraft infolge des verwendeten Materiales. Einer wesentlichen Herabsetzung der Dimensionen der Empfängerscheibchen stand prinzipiell nichts im Wege, da ja im Brennpunkt des Fernrohres gearbeitet werden sollte. So entstand eine Konstruktion, die zum ersten Male im Sommer 1913 am 26 Zoll der Naval-Observatoriums und im folgenden Sommer am 36zolligen Crossley-Spiegel der Lick-Sternwarte in Verwendung trat¹. Diese Anordnung war der PFUNDschen etwa 120mal überlegen. Die Versuche wurden mit Kriegsausbruch eingestellt und erst nach 7 Jahren wieder aufgenommen, die thermoelektrische Anordnung ließ man aber im Prinzip unverändert.

In einem ausgepumpten Glasgehäuse — daher Vakuum-Thermoelement — befindet sich der Meßkörper (s. Abb 31), und zwar bei Apparat Nr 7 zwei, bei Apparat Nr 6 drei Paare von Thermoelementen, die nach Belieben verwendet werden können. Bei Type Nr 7 besteht das Element 1 aus Wismut und einer Legierung von Wismut und 5 % Zinn, das Element 2 aus der Kombination Wismut-Platin. Die Drahtdicke ist bei diesen auf der Lick-Sternwarte verwendeten Elementen von der Größenordnung $7 \cdot 10^{-3}$ mm. Jedes Element trägt an den Lotstellen *a* und *b* flache geschwarzte Empfängerscheibchen aus Zinn. COBLENTZ arbeitete ursprünglich, im Gegensatz zu PFUND und den Mt Wilson-Beobachtern (Ziff 32), nur mit einem Empfänger und verzichtete darauf auf den doppelten Galvanometerausschlag, der bei abwechselnder Belichtung der Empfänger *a* und *b* zu erzielen war. Die Durchmesser der Empfängerscheibchen sind 1a 0,38, 1b 0,44, 2a 0,29 und 2b 0,33 mm. Im dreifachen Meßkörper Nr 6 ist das Element 3 ebenso zusammengesetzt wie das Element 1 in Nr 7, die Elemente 1 und 2 in Nr 6 ebenso wie Element 2 in Nr 7. Der Unterschied der Elemente 1 und 2 liegt nur in der Anordnung der beiden Empfängerscheibchen. Die U-förmige Verbindung der Empfänger in Nr 6 (1) bringt die Empfängerscheibchen sehr nahe aneinander (Distanz 0,5 bis 1,0 mm [s. auch die analoge Anordnung auf dem Mt Wilson, Abb 35 C in Ziff 32]), ein Vorteil, der erst 1921 bei abwechselnder Verwendung beider Empfängerscheibchen in Erscheinung trat. So findet sich diese Anordnung zum Beispiel² bei den Meßgeräten Nr 9 und 12, die sich vor allem auch dadurch auszeichnen, daß es hier gelungen ist, die Drahtdicke bis auf 2 bis $3 \cdot 10^{-3}$ mm zu verringern. Beim Apparat Nr 12, ebenso bei Nr 4, dient jetzt als Drahtmaterial die Elemente der Kombination Bi mit einer Legierung von Platin-Rhodium. Auf dem Pt-Rh-Draht sind wieder die Empfänger, flach gepreßte Zinnscheibchen, angebracht. In der Absicht, mit ihnen auch Detailmessungen einzelner Regionen von Mars und Jupiter vornehmen zu können, sind die Dimensionen der Empfängerscheibchen 1922 neuerlich verkleinert worden. Sie kommen bereits nach 2^h bis 3^h Belichtung in Temperaturgleichgewicht gegenüber einem Zeitraum von 8^h bis 10^h bei den früheren Modellen. Die Befestigung der Elemente ist in der linken oberen Skizze der Abb 31 zu sehen. Die Pt-Drähte sind in ein Glasröhrchen *T* eingeschlossen, das wiederum bei *K* in das Fenster *G* des Gehäuses eingekittet ist. Das Gehäuse selbst ist in Abb 32 wiedergegeben. Dieses Bild zeigt das Meßgerät in der Form, die bei allen Arbeiten von COBLENTZ und seinen Mitarbeitern verwendet wurde. Die Thermoelemente *Th* sind in der früher geschilderten Weise in dem evakuierten Glasbehälter *B* angebracht, dessen langes Ansatzröhr zum Zwecke der Erhaltung des Vakuums mit metallischem Kalzium gefüllt ist. Die zu messende Strahlung fällt durch das Fenster *F*, das entweder aus Flußspat oder Stemsalz besteht, auf den Empfänger in *B*. Da es sich zeigte, daß auch bei Sternen von spätem

¹ Lick Bull 8, S 101 (1915). Diese Veröffentlichung ist inhaltlich gleichlautend mit der Arbeit in Bull Bur of Stand 11, S 613 (1915) oder Sci Pap Bur of Stand 1915, Nr 211.

² Bull Bur of Stand 17, S 725 (1922), 18, S 535 (1922).

Spektraltypus eine Strahlung größer als 4μ höchstens 1 bis 10% der Gesamtstrahlung ausmache¹, genügen im allgemeinen Fenster aus Quarz. Auf der Rückseite R des Gefäßes gestattet ein Glasfenster den Einblick auf den Empfänger. Mittels eines Okulares (s Abb 33 in Ziff 31) kontrolliert man durch dieses Fenster die Lage des Planetenscheibchens bzw des zu messenden Fixsternes.

31 Die Untersuchungen von W W COBLENTZ Die von W W COBLENTZ und seinen Mitarbeitern 1914 mit dem 36zolligen Crossley-Reflektor der Lick-Sternwarte, 1921, 1922 und 1924 mit dem 40zolligen Reflektor der Lowell-Sternwarte vorgenommenen Untersuchungen behandelten folgende Probleme: 1 die Gesamtstrahlung von Fixsternen, 2 die Wasserzellenabsorption (Definition Ziff 3) von Fixsternen, 3 Strahlungsmessungen der Fixsterne in mehreren Spektralbereichen und 4 Strahlungsmessungen der Planeten.

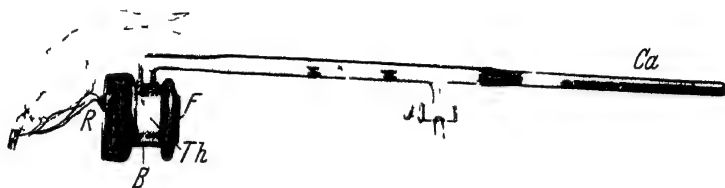


Abb 32 Die thermoelektrischen Strahlungsmessungen von W W COBLENTZ. Der auf der Lick- und Lowell-Sternwarte verwendete evakuierte Behälter für die Thermoelemente (Im übrigen siehe Text)

Die größte Beobachtungsreihe von Gesamtstrahlungsmessungen der Fixsterne (110 Objekte) wurde 1914 auf der Lick-Sternwarte gewonnen². In Verbindung mit

Tabelle 6 Galvanometeraussschläge (G A) thermoelektrischer Messungen für einige Fixsterne (nach den Beobachtungen von W W COBLENTZ 1914 und 1921)

Stern	Sp	m_v	G A
α Aql	A5	+0,90	1,89
α Tau	K5	1,06	6,03
α Ori	Ma	0,92	15,0
α C1 B	A0	2,32	0,48
β UMa	A0	2,44	0,37
γ Dra	K5	2,42	1,65
δ Cap	A5	2,98	0,28
β Aqr	G	3,07	0,55
ν Tau	A	3,94	0,12
γ Tau	G	3,86	0,36
δ Tau	K	3,93	0,52
81 ϕ Peg	Ma	5,23	0,22
19 Psc	M	5,30	0,46

reihen, sind in Tabelle 6 angeführt. Demnach ist bei gleichen visuellen Helligkeiten die Totalstrahlung von Sternen M bis N 3- bis 4-mal größer als bei Steinen.

¹ Ap J 55, S 20 (1922)

² Lick Bull 8, S 104 (1915)

³ Bull Bur of Stand 18, S 558 (1922)

⁴ Ap J 55, S 20 (1922), Bull Bur of Stand 17, S 725 (1922)

dem Crossley-Spiegel und bei einer Galvanometerempfindlichkeit von $1 \cdot 10^{-10}$ Amp konnten quantitative Ergebnisse bis zur Größenklasse $5^{m,3}$ und qualitative Ergebnisse bis $6^{m,7}$ erzielt werden. Es sei noch bemerkt, daß die 1921 vorgenommene Wiederholung einiger Messungen auf der Lowell-Sternwarte keine Erhöhung der Empfindlichkeit gebracht hat³. In der Lick-Arbeit werden die erhaltenen Ausschläge für die einzelnen Sterne in Zentimetern, bzw in Einheiten der Galvanometerempfindlichkeit gegeben, und zwar getrennt für die beiden Empfänger Nr 6, Element 3b, und Nr 7, Element 1a (s Abb 31). Die Kontrollmessungen, die für einige Sterne 1921 in Flagstaff vorgenommen wurden⁴, ergaben befriedigende Übereinstimmung. Einige Ergebnisse, zusammengefaßt aus beiden Beobachtungs-

der Klassen B bis A. Eine Umwandlung der Ausschläge in radiometrische Helligkeiten (s. Ziff 3) ist bei diesen Arbeiten von COBLENTZ nicht vorgenommen worden. Es fehlen auch alle Angaben über den Strahlungsverlust in der Erdatmosphäre, so daß von absoluten Messungen natürlich nicht gesprochen werden kann.

In der Erwägung, daß Vergleichen früher und später Spektraltypen durch Totalstrahlungsmessungen allein unsicher sind, hat COBLENTZ bereits 1914 den Versuch unternommen, durch Vorschalten einer Wasserzelle relative Intensitätsmessungen in zwei breiten Spektralbezirken eines Sternes zu gewinnen. Diese Wasserzelle ist 1 cm dick und durch dünne Quarzfenster abgeschlossen. Sie ist durchlässig für Strahlung von λ 3000 bis λ 10000, in geringem Maße auch noch bis λ 14000. Eine Gesamtstrahlungsmessung und eine Messung mit Wasserzelle ist demnach ein einfaches und rasches Mittel zur Bestimmung der infraroten Sternstrahlung. Für B- und A-Sterne betrug die Wasserzellendurchlässigkeit 82%¹. Da die maximal zu beobachtende Durchlässigkeit der Wasserzelle etwa 91% beträgt und der Verlust durch die Spiegel noch zu berücksichtigen ist, besitzen also Sterne von frühem Spektraltypus praktisch keine infrarote Strahlung über λ 10000 ($1,0\mu$). Demgegenüber ist die Wasserzellendurchlässigkeit bei ϵ Gem ($\gamma 5$) 66%, bei α Tau (K5) 42% und bei α Ori (Ma) 34%. Eigentümlicherweise ist die Durchlässigkeit bei Doppelsternen geringer, als sie dem Spektraltypus gemäß sein sollte. Dies ist besonders bemerkenswert bei Sirius mit 65%, gegenüber Wega mit 75%. Entgegen der Ansicht, daß der Siriusbegleiter dem A-Typus angehört, weist COBLENTZ auf die im übrigen wohl in Vergessenheit geratene Tatsache hin, daß der Siriusbegleiter auf Grund der thermoelektrischen Messungen eine 2- bis 3mal so große Infrarotstrahlung besitzen müsse als Sirius. Die Messungsergebnisse mit und ohne Wasserzelle, die COBLENTZ 1914 und 1921 bei Fixsternen erhalten hat, sind 1923 von J. WILSING² zur Prüfung der Potsdamer Temperaturskala verwendet worden.

Neben der Wasserzelle hat COBLENTZ zur Durchführung der dritten und vierten der obengenannten Aufgaben noch weitere Filter verwendet³. So gab ein Gelbglas in Verbindung mit der Wasserzelle Strahlung im Bereiche von λ 4300 bis λ 14000, ein Rotglas mit der Wasserzelle im Bereiche von λ 6000 bis λ 14000. Durch Kombination mit den Meßergebnissen bei Verwendung der Wasserzelle allein ergaben sich die Bezüge λ 3000 bis λ 6000 bzw. λ 4300 bis λ 6000. Mit einem Quarzfenster erhielt man Strahlung von λ 3000 bis λ 41000, mit dem Flußspatfenster Strahlung bis λ 100000 (10μ) und mit einem Steinsalzfenster Strahlung bis 150000 (15μ), bei welcher Wellenlänge die Atmosphäre selbst bereits als strenges Filter wirkt. Die verschiedenen Filter sind während der Beobachtung einzeln oder kombiniert sehr rasch einzusetzen. Drei von ihnen erkennt man in Abb. 33, wo sie mit F_1 , F_2 und F_3 bezeichnet sind. Sie werden durch die Hebel H_1 und H_2 in den Strahlengang eingeschaltet. Das Lampchen dient zur Beleuchtung während der Bedienung dieser Hebel. Die Abbildung zeigt zugleich das Okular O , mit welchem der Stern justiert wird. Die ganze Anordnung ist so montiert, daß der Meßapparat, wie er in Abb. 33 wiedergegeben ist, an die Stelle der photographischen Kassette in den Reflektor eingeschoben werden kann.

Mit Hilfe der Filter bestimmte COBLENTZ die Energieverteilung in den Spektren von 16 Sternen⁴. Folgende Spektralbereiche konnten einzeln erfaßt werden, wobei die Einwirkung der Absorptionsbanden jedoch unberücksichtigt geblieben

¹ Bull. Bur. of Stand. 17, S. 725 (1922), Pop. Astr. 3, S. 105 (1923).

² A. N. 220, S. 1 (1923), s. auch Beitrag BRILL, ds. Handb. V/1, Kap. 3, Ziff. 22.

³ Siehe z. B. Bull. Bur. of Stand. 17, S. 725 (1922), Pop. Astr. 31, S. 105 (1923), Publ. A. S. P. 36, S. 220 (1924), J. Franklin Inst. Juni 1925.

⁴ Bull. Bur. of Stand. 17, S. 725 (1922), Sc. Pap. Bur. of Stand. 1922, Nr. 438.

ist $\lambda 3000$ bis $\lambda 4300$, $\lambda 4300$ bis $\lambda 6000$, $\lambda 6000$ bis $\lambda 14000$, $\lambda 14000$ bis $\lambda 41000$ und $\lambda 41000$ bis $\lambda 100000$ (10μ) Auch diese Messungen können nicht als Absolutmessungen angesehen werden, sondern ergeben nur die Strahlungsenergien, wie sie an der Erdoberfläche beobachtet werden Für die A-Steine zeigte sich das Energie maximum im Bereiche zwischen $\lambda 3000$ und $\lambda 4000$, bei den K- und M-Sternen zwischen $\lambda 7000$ und $\lambda 9000$ Die aus diesen Messungen nach dem PLANCKschen Gesetz errechneten Sterntemperaturen finden sich in Tabelle 5 des Beitrages von A BRILL, ds Handb V/1, S 150 in der Rubrik „COBLENTZ“ Über die Versuche, die Energieverteilung in den Sternspektren mit Hilfe des Bolometers und des Radiometers zu erfassen, wird in den folgenden Ziff 34 und 37 berichtet

Die Arbeiten der genannten vierten Aufgabe¹, die Bestimmung der von einem Planeten kommenden Strahlung, erfolgten ebenfalls mit Verwendung der Wasserzelle und der anderen obengenannten Filter Über diese Untersuchungen wird im

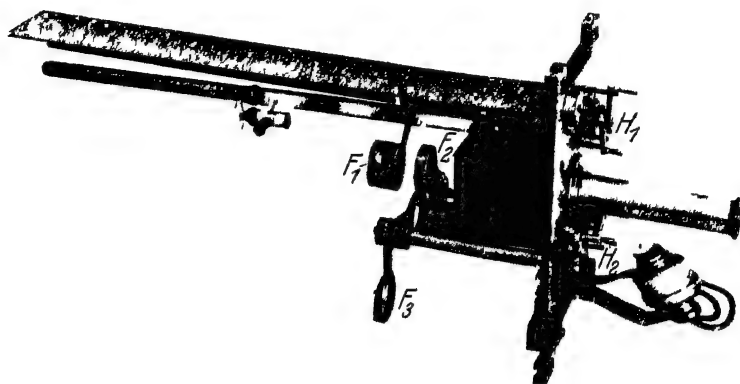


Abb 3: Der thermoelektrische Meßapparat von W W COBLENTZ (siehe Abb 32), fertig montiert zum Einsetzen in den Okularteil des Reflektors. F_1 , F_2 , F_3 sind ausschwenkbare Filter, H_1 und H_2 die zugehörigen Bedienungsräder

Beitrag von K GRAFF, ds Handb IV, Kap 3, berichtet Wie schon erwähnt, sind thermoelektrische Untersuchungen mit ähnlicher Apparatur auf der Mt Wilson-Sternwarte von E PETTIT und S B NICHOLSON (Ziff 32 u 33) vorgenommen worden Eine Vergleichung der Ergebnisse, soweit sie die Strahlungsmessungen des Planeten Mars betreffen, hat COBLENTZ im Jahre 1926 veröffentlicht² Die COBLENTZschen Werte der Wasserzellenabsorption einiger auf der Lowell-Sternwarte beobachteten Fixsterne sind 1928 von E PRILLI und S B NICHOLSON³ mit den Mt Wilson-Ergebnissen (s Ziff 33) verglichen worden

32 Die thermoelektrischen Meßinstrumente auf der Mt Wilson-Sternwarte Wie in Ziff 30 erwähnt, ist nach den erfolgreichen Arbeiten von W W COBLENTZ, die 1913 auf der Lick-Sternwarte vorgenommen wurden, in den thermoelektrischen Untersuchungen der Fixsterne eine mehrjährige Unterbrechung eingetreten COBLENTZ hat seine Messungen erst wieder im Sommer 1921 auf der Lowell-Sternwarte aufgenommen Bald darauf gingen E PETTIT und S B NICHOLSON daran, auch auf der Mt Wilson-Sternwarte analoge

¹ Siehe Pop Astr 30, S 551 (1922), 31, S 105 (1923), 32, S 516 u 570 (1924), Publ ASP 36, S 220 u 272 (1924), Wash Nat Ac Proc 11, S 34 (1925), J Franklin Inst Juni 1925, Lowell Bull 3 S 91 (1925), Pop Astr 33, S 297 (1925), A N 221, S 361 (1925), Pop Astr 33 S 310 u 363 (1925), Bull Bur of Stand 20 S 371 (1925), Ap J 63, S 177 (1926)

² A N 227, S 421 (1926) ³ Ap J 68, Fig 2 auf S 293 (1928)

Messungen mit Thermoelementen durchzuführen. Das erste veröffentlichte Ergebnis¹ bezieht sich auf die Messung der Gesamtstrahlung von α Cet am 6. Dezember 1921.

Im Laufe der Jahre verwendeten die genannten Beobachter im wesentlichen drei verschiedene Typen thermoelektrischer Instrumente, die in Abb. 34 wiedergegeben sind. Insbesondere die mit 3 bezeichnete Vorrichtung wurde für astrophysikalische Messungen herangezogen.

Bereits im Jahre 1895 hatte LEBEDEV² darauf hingewiesen, daß bei Evakuierung des Empfängergerätes die Empfindlichkeit eines Thermoelementes

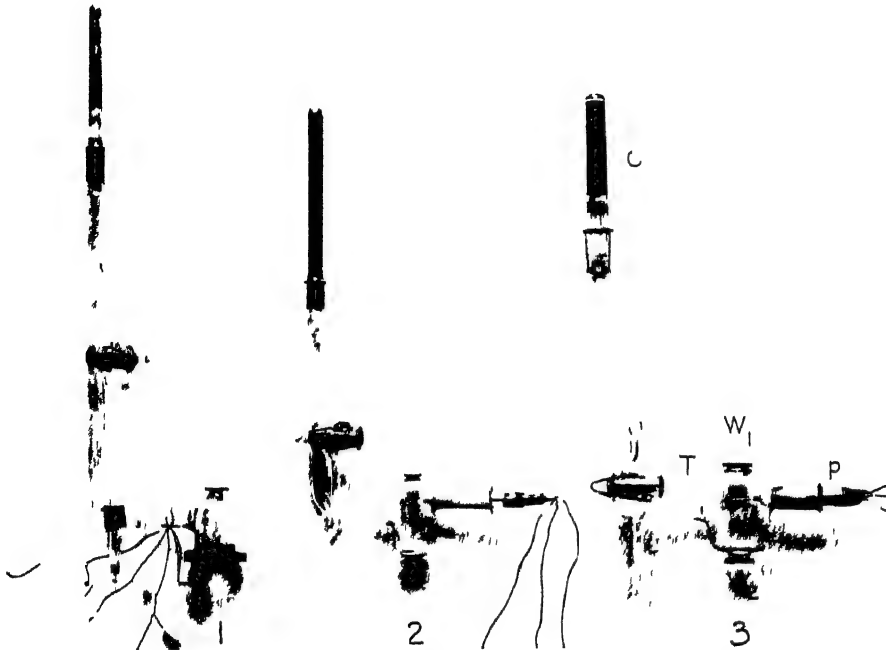


Abb. 34. Drei verschiedene Typen der auf der Mt. Wilson verwendeten thermoelektrischen Meßapparate. (Vgl. den Apparat von COBLENTZ Abb. 32, S. 172) [ApJ 56 (1922)]

wesentlich gesteigert werden kann. Auch bei den astrophysikalischen Untersuchungen von PFUND (Ziff. 29), COBLENTZ (Ziff. 30 u. 31) sowie bei den Mt. Wilson-Arbeiten hat man sich meistens der Vakuum-Thermoelemente bedient, erst in neuester Zeit (s. Ziff. 23 u. 25) pflegt man auch wieder Elemente in Luft zu verwenden. PFUND hatte bei seinen Versuchen auf der Allegheny-Sternwarte Vakuumelemente mit einer sechsfachen Empfindlichkeitssteigerung zur Verfügung, COBLENTZ konnte bei seinen Typen gegenüber nichtevakuierten Empfängern einen 4,5fachen Gewinn feststellen. Der Zusammenhang zwischen Empfindlichkeit und Druck im Inneren des Empfängergerätes ist von PRILL und NICHOLSON im Laboratorium eingehend geprüft worden. Es zeigte sich, daß hier mehrere Faktoren maßgebend sind, da selbst Thermoelemente aus gleichem Material und von identischer Bauart ein verschiedenes Verhalten aufwiesen. Im allgemeinen genügte bei den Thermoelementen der Kombination Ag-Te eine Evakuierung auf $1 \cdot 10^{-2}$ mm, dagegen mußte bei der Kombination Bi-Sn bis

¹ Publ. A.S.P., S. 132 (1922)

² Ann. d. Phys. 56, S. 12 (1895)

auf $1 \cdot 10^{-4}$ mm Druck herabgegangen werden, um einen nennenswerten Effekt zu erzielen. Die geringste von PETTIT und NICHOLSON¹ erreichte Empfindlichkeitssteigerung gegenüber Elementen in Luft war zweifach, die größte elfach, in beiden Fällen bei einem Druck von $1 \cdot 10^{-4}$ mm. Zur Erhaltung des Vakuums ist auch bei den neuen Arbeiten der Mt Wilson-Sternwarte entsprechend den von COBLENTZ früher gewonnenen Erfahrungen metallisches Kalzium verwendet worden. Es befindet sich bei C der Abb 34 (3) in einem Röhrchen von 14 mm Durchmesser, bestehend aus reinem Quarz. Der Behälter A des Strahlungsapparates aus Pyrexglas hat einen inneren Durchmesser von 42 mm und eine Wandstärke von 1,5 mm. Hier eingebettet befindet sich das auf kleinstmögliche Dimensionen gebrachte Thermoelement, zu dem durch den Stopfel P drei feine Platindrahte führen. Die zu messende Strahlung fällt durch das Quarzfenster W_1 von 1,5 mm Dicke. Das andere Fenster W_2 dient zur Beobachtung der sicheren

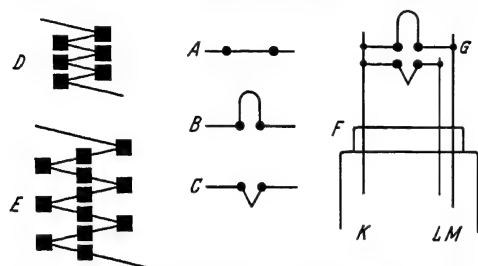


Abb 35 Verschiedene Formen der auf dem Mt Wilson verwendeten Thermoelemente A, B, C drei Typen von Thermoelementen, F schematisches Bild eines Doppelthermoelementes mit seinen Platin-Zuführungsdrähten K, L und M, D und E sind Formen von Thermosäulen, die bei Spektralarbeiten Verwendung fanden [Ap J 56 (1922)]

Wismut mit 5 % Zinn zu erzielen zu sein. Bei den Arbeiten des Jahres 1922³ hatten die Metalldrähte der Elemente eine Länge von 3 mm und die Dimensionen $8 \cdot 10^{-3}$ mal $1 \cdot 10^{-1}$ mm. An den beiden Enden bildeten, wie üblich, geschwärzte Zinnscheibchen von $5 \cdot 10^{-1}$ mm Durchmesser und $1 \cdot 10^{-2}$ mm Dicke die eigentlichen Empfänger, wobei nach den Erfahrungen von PFUND (Ziff 29) abwechselnd das eine und das andere Scheibchen der Sternstrahlung ausgesetzt wurde, welcher Vorgang eine Verdoppelung der Galvanometerausschläge (siehe Abb 37, S 479) herbeiführt.

Die ursprünglich gewählte Anordnung der Empfängerscheibchen ersieht man aus der obersten Skizze A der Abb 35. Später hat man die Scheibchen einander näher gebracht und den Draht der Verbindung U-förmig gewunden wie in Skizze B, oder es wurde in jenen Fällen, wo das Material dies nicht zuließ, die in Skizze C wiedergegebene Form der Verbindung gewählt. Die rechts gezeichnete Skizze F zeigt ein schematisches Bild eines bei den astrophysikalischen Untersuchungen verwendeten Doppелеlementes und seine Verbindung mit den drei herausführenden Platindrähten K, L und M (Es sind dies die drei Ausführungsdrähte, die in ihrem weiteren Verlauf in den Bildern der Instrumenttypen [Abb 34, S 475] zu ersehen sind). Die Skizzen D und E der Abb 35 schließlich zeigen die schematische Anordnung von Thermosäulen, die PETTIT und NICHOLSON bei ihren Spektralarbeiten verwendet haben.

¹ Ap J 56, S 259 (1922)

² Ap J 68, S 279 (1928)

³ Ap J 56, S 259 (1922)

Einige Angaben über die Herstellung neuer Elemente für thermoelektrische Spektraluntersuchungen sind 1929 veröffentlicht worden¹. Hier werden an die beiden Enden eines überaus feinen Kupferstreifens Drahte von Wismut bzw. Wismut + 5% Zinnlegierung angelotet. Letztere sind wiederum mit Kupferdrahten von 0,015 mm Querschnitt zusammengelotet. Diese Kupferdrahte hängen schließlich mit den Platinausführungsdrähten zusammen. Wie sorgfältige Laboratoriumsmessungen zeigten, ist es gelungen, den Querschnitt des erstgenannten Kupferstreifens auf $0,49 \mu$ herabzusetzen.

Das Gewicht der normal verwendeten Thermoelemente ist von der Größenordnung 0,03 mg. Die Thermoelemente, die zu den Arbeiten am Hooker-

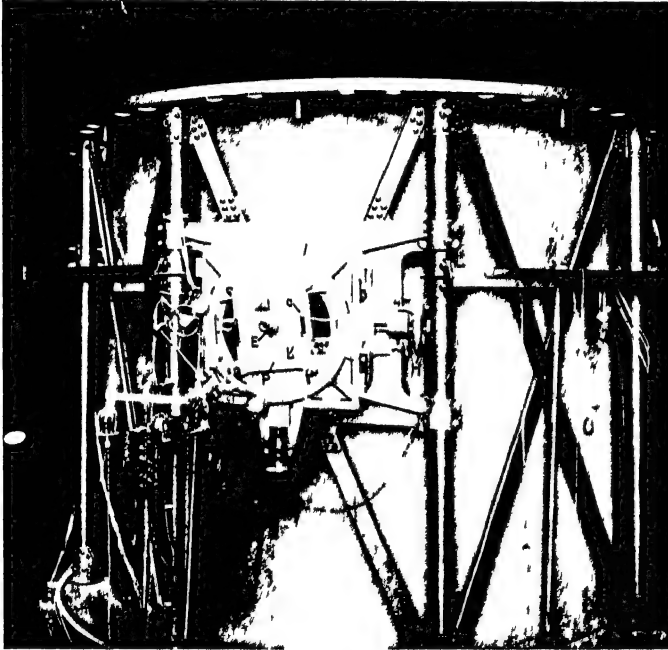


Abb 36 Das obere Ende des Hooker-Spiegels auf dem Mt Wilson, versehen mit der thermoelektrischen Meßvorrichtung (siehe Text) [Pop Astr 32 (1924)]

Teleskop der Mt Wilson-Sternwarte herangezogen wurden, hatten Empfängerscheibchen von je 0,5 mm Durchmesser und 0,03 mg Gewicht. Das Gewicht des Kompensationssystems (die Empfängerscheibchen der „warmen“ und „kalten“ Lotstellen zusammen) einschließlich der Verbindungsdrähte betrug 0,1 mg.

Für die Beobachtung mit dem Hookerspiegel wurde das Meßgerät unmittelbar an der photographischen Kassetteneinrichtung des Newton-Fokus angebracht, und zwar hinter dem Okular *L* (Abb 36) an der Platte *P* des Kreuzschlittens befestigt. Durch das Okular *L* pointierte man den Stern (Planeten) auf eines der beiden Empfängerscheibchen. Die Verschiebung des Beobachtungsobjektes von einem Empfänger zum anderen war mit dem Handgriff *H* leicht zu bewerkstelligen. Der bei *L* angedeutete kleine Hebel diente, analog wie die beiden Bedienungsgriffe *H*₁ und *H*₂ bei der Anordnung von COBLENZ (Abb 33), zur Vorschaltung der Filter. Die Leitungsführung vom Thermoelement zum Galvanometer

¹ E. PLIHL, Publ A S P 41, S 272 (1929)

ist bei c zu erkennen. Bei I befand sich ein Telefon zur raschen Verständigung des am Okular des Newton-Fokus arbeitenden Beobachters mit dem entfernten zweiten Beobachter, der die Ausschläge des Galvanometers zu notieren hatte.

Gearbeitet wurde mit einem Galvanometer der Empfindlichkeit $5 \cdot 10^{-10}$ Amp pro mm Skalenlänge, späterhin mit einem solchen von $3 \cdot 10^{-10}$ Amp/mm. Die Skala befand sich in beiden Fällen in 8 m Distanz. Die gewählte Anordnung gestattete, noch 0,1 mm genau abzulesen. Im Falle der photographischen Registrierung (s Abb 37, S 479) wird der wF eines Galvanometeraussschlages zu $\pm 0,015$ mm veranschlagt, im übrigen ergab sich ein Wechseln der Genauigkeit mit der Jahreszeit. Die Temperaturempfindlichkeit der Anordnung betrug bei Verwendung des erstgenannten Galvanometers etwa $8 \cdot 10^{-5}$ Grad/mm.

33. Die Untersuchungen von E PETTIT und S B NICHOLSON Die thermoelektrischen Untersuchungen mit dem 100 zolligen Hooker-Spiegel der Mt Wilson-Sternwarte an Fixsternen, zeitweise an Planeten, haben im Dezember 1921 begonnen und wurden, soweit bekannt, bis 1927 fortgeführt. Strahlungsmessungen des Mondes liegen auch noch aus 1929 vor¹. Die speziellen thermoelektrischen Untersuchungen der ultravioletten Sonnenstrahlung² (s Ziff 23 u 24) werden seit 1924 vorgenommen und sind auch heute noch Programmarbeiten dieses Observatoriums.

Insgesamt hat man 12 verschiedene Empfangsapparate gebaut, die Unterschiede beziehen sich im wesentlichen aber nur auf das Material der Fenster des evakuierten Empfangergehäuses. Verwendet werden, wohl nach dem Vorbild von COBLENTZ, Mikroskopdeckgläser, Quarz, Flußspat und Steinsalzfenster. Der Durchlassigkeitsbereich für ein Deckglaschen von 0,165 mm Dicke reicht von λ 3000 bis λ 80000 (8μ), des Flußspatfensters (Dicke 4 mm) von λ 3000 bis λ 120000 (12μ) und des 2 mm starken Steinsalzfensters von λ 3000 bis λ 140000 (14μ). Die sorgfältig ermittelten Transmissionskurven³ (vgl. diesbezüglich die wichtige Untersuchung⁴ von PETTIT und NICHOLSON aus dem Jahre 1927 über die Eigenschaften von 44 Filtern) sind aus Abb 38, S 481 zu ersehen. Ebenso wie auf der Lick- und Lowell-Sternwarte kam auch auf dem Mt Wilson eine 1 cm dicke Wasserzelle zur Anwendung, zum ersten Male 1922 gelegentlich der thermoelektrischen Untersuchungen einiger langperiodischer Veränderlichen⁵. Die Wasserzelle läßt praktisch alle Strahlung bis $1,1 \mu$ durch, Strahlung zwischen $1,1$ und $1,4 \mu$ wird zum großen Teil, die über $1,4 \mu$ völlig absorbiert. Es sei darauf hingewiesen, daß die maximalen Galvanometeraussschläge, die ein Stein bei Vorschalten der Wasserzelle erzielen kann, niemals 90% der ohne Wasserzelle beobachteten Ausschläge übersteigt. Die Wirkung dieses Filters kann aus den in Abb 37 wiedergegebenen Beispielen ersehen werden. Sie zeigen photographische Registrierungen der Galvanometeraussschläge von α Lyr (A0), α Boo (K0), α Her (M0) und R Hya (M0). Da, wie in Ziff 32 erwähnt, die beiden Empfängerscheiben eines Thermoelementes abwechselnd bestrahlt werden, erhält man zwei Reihen von Registrierungen, deren Abstand dem doppelten Galvanometeraussschlag entspricht. Die in der Abbildung ersichtlichen zentralen Marken zwischen diesen beiden Reihen zeigen die Galvanometernulllage im unbestrahlten Zustand an. Durch regelmäßige Registrierung der Dunkelstellung ist eine stete Kontrolle einer eventuellen Galvanometertrift gewährleistet. Bei jedem Stern wird abwechselnd mit und ohne Vorschalten der Wasserzelle gearbeitet. Die Abbildung zeigt links die Ausschläge ohne Filter und rechts die Ausschläge mit Wasserzelle, die mit fortschreitendem Spektraltypus zunehmende Wasserzellenabsorption ist deutlich

¹ Ap J 71, S 102 (1930)

² Ap J 75, S 185 (1932)

³ Fig 1 auf S 104 in Ap J 71 (1930)

⁴ Ap J 66, S 43 (1927)

⁵ Publ A S P 34, S 181 (1922)

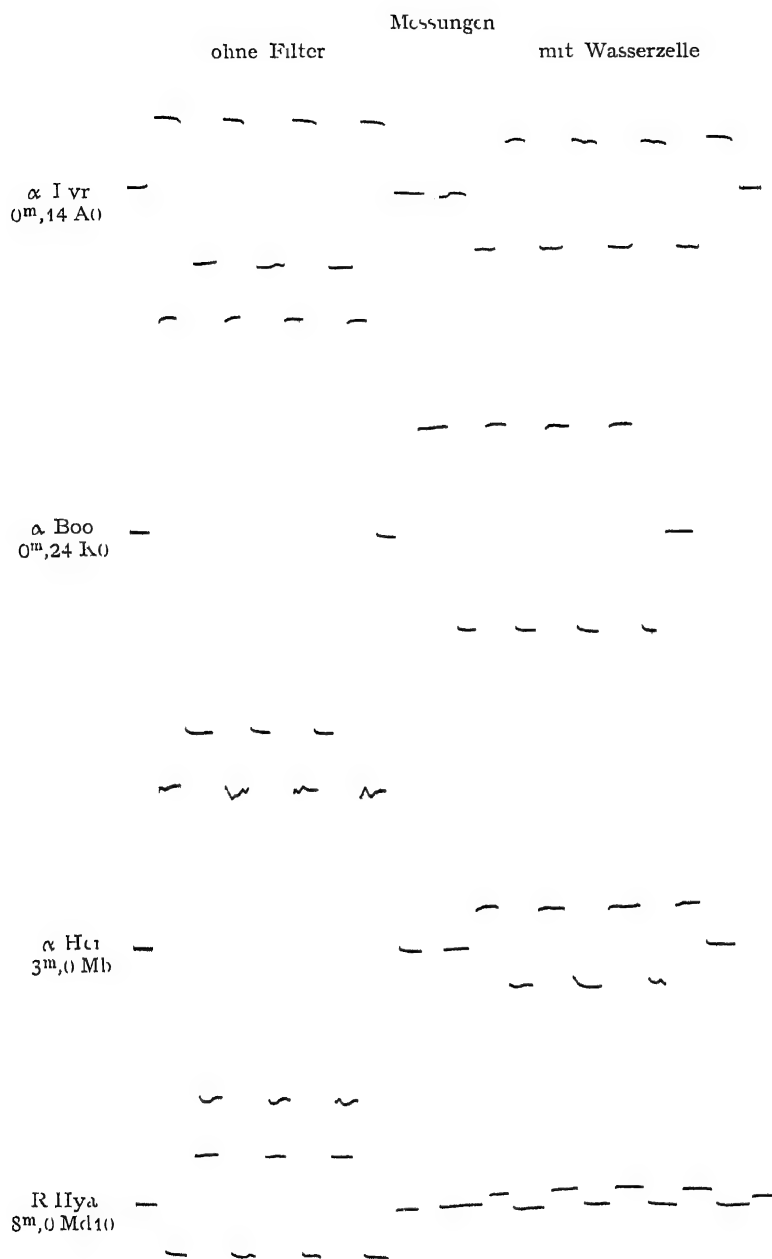


Abb 37 Thermoelektrische Untersuchungen auf dem Mt Wilson. Die Galvanometerausschläge bei Sternen von verschiedenem Spektraltypus photographisch registriert. Rechts Ausschläge mit Filter (Wasserzelle), links ohne Filter. Bei jedem Stern entsprechen die oberen Marken der Belichtung des Empfängerseibchens *a*, die unteren des Empfängerseibchens *b* (siehe z. B. Abb 31, S. 470). Die mittleren Marken zeigen die Nullage bei unbelichtetem Zustand an. [Ap J 56 (1922)]

zu erkennen. Bei der Untersuchung des gesamten auf dem Mt Wilson erhaltenen Materials¹, in das sich bemerkenswerterweise die von COBLENZ auf der Lowell-Sternwarte gewonnenen Ergebnisse² zwanglos einordnen lassen, zeigt sich ein fast vollkommener linearer Zusammenhang zwischen der Wasserzellenabsorption in Größenklassen (WZA definiert in Ziff 3) und der Spektralklasse der betreffenden Sterne. Demgemäß ist auch die WZA zur Ermittlung von Stern-temperaturen bereits weitgehend herangezogen worden³.

Die Galvanometerausschläge für die Messungen ohne Filter (Gesamtstrahlung) der Sterne sind von PETTIT und NICHOLSON in „radiometrische Größenklassen“ (Definition in Ziff 3) umgewandelt worden. Zur Vereinheitlichung der gewonnenen Daten sind an die scheinbaren radiometrischen (Größen m_r) durchweg drei Korrekturen angebracht worden. Die erste Korrektur bestand in der Zenitreduktion für den Mt Wilson

$$A_1 m_r = -A (\sec z - 1),$$

wobei zur Bestimmung des Faktors A folgendermaßen verfahren wurde. Jede Nacht beobachtete man zwei Standardsterne bei mehreren Luftmassen ($\sec z$), den einen Stern vor, den anderen nach Mitternacht. Man zeichnete dann in einem Diagramm mit $\sec z$ als Abszissenachse und mit \log der Galvanometerausschläge als Ordinate die gewonnenen Daten der Standardsterne ein und extrapolierte die so erhaltene Gerade bis zur Luftmasse 1 (Zenit Mt Wilson). So erhält man den für eine Zenithelligkeit geltenden zusätzlichen Galvanometerausschlag, der, in Größenklassen verwandelt, den Faktor A darstellt. Nach diesem im übrigen nicht völlig einwandfreien Vorgang (vgl. die Bemerkungen in Ziff 24) erhält man A -Werte zwischen $0^m,07$ und $0^m,49$, im Mittel $0^m,16$. Der durchschnittliche Betrag der ersten Korrektur $A_1 m_r$ war $-0^m,05$ und überstieg in 6% der beobachteten Fälle $-0^m,15$.

Die zweite Korrektur reduziert die Helligkeiten auf die Ergebnisse, die bei frischer Versilberung der Spiegel des 100-Zollers erzielt werden. Ist D die Zahl der Tage, die seit der Neuversilberung verflossen sind, und S ein empirischer Reduktionsfaktor, der naturgemäß eine starke Abhängigkeit vom Spektraltypus der untersuchten Sterne zeigt, so wird die zweite Korrektur

$$A_2 m_r = D \cdot S$$

Bei den extremen Spektraltypen erreicht sie $0^m,2$, im Durchschnitt ist sie von der Größenordnung $\pm 0^m,08$. Es sei noch bemerkt, daß im Hinblick auf den Null-

punkt der radiometrischen Größenskala der Faktor S für A0-Sterne zu Null angenommen wurde, in Wirklichkeit erfolgt natürlich auch bei A0-Sternen ein Strahlungsverlust infolge Reflexion an den Spiegeln.

Die dritte Korrektur $I_3 m_r$ bezweckt die Reduktion der mit Glas, Quarz- oder Flußspatfenster vorgenommenen Messun-

gen auf die bei Verwendung eines Steinsalzfenster im Gehäuse erzielten Ergebnisse. Auch diese Korrektur steht naturgemäß in Abhängigkeit vom Spektraltypus der untersuchten Sterne.

Tabelle 7

m_r	Ausschlag	m_r	Ausschlag
-1	250,00 mm	+5	1,00 mm
0	100,00	+6	0,40
+1	39,80	+7	0,16
+2	15,90	+8	0,06
+3	6,30	+9	0,02
+4	2,51	+10	0,01

¹ Ap J 68, S 279 (1928) = Mt Wilson Contr. Nr. 369

² Bull. Bur. of Stand. 17, S 725 (1922), s. auch Ap J 55, S 20 (1922)

³ Siehe den Beitrag von A. BRILL, Die Temperaturen der Fixsterne. Ds. Handb. V/1, Kap. 1, Ziff. 22

Unter normalen Verhältnissen erzielte man für α Aql ($m_0 = +0^m,89$, $m_r = 0^m,74$, Spektrum A2n) einen Ausschlag von 49,4 mm. Bei dieser Empfindlichkeit ist zwischen Galvanometerausschlag und m_r vorstehender Zusammenhang gegeben (Tab. 7).

Wie bereits in Ziff. 3 auseinandergesetzt, ist auch der Versuch gemacht worden, die auf dem Mt. Wilson gewonnenen radiometrischen Größen m_r in bolometrische m_b umzuwandeln. Hierzu ist eine Berücksichtigung des Strahlungsverlustes in der Apparatur und in der Erdatmosphäre bedingend. Nennt man nun Δm_r die aus beiden Quellen stammende Korrektur der radiometrischen Größe, so wird

$$m_b = m_r - \Delta m_r + (W I^* + \Delta m_r^*),$$

wobei durch den Klammerausdruck der Nullpunkt festgelegt wird. Es bedeutet der Klammerausdruck den Wärmeindex plus Korrektur eines Standardsterns* mit der effektiven Temperatur jenes schwarzen Strahlers, für den radiometrische

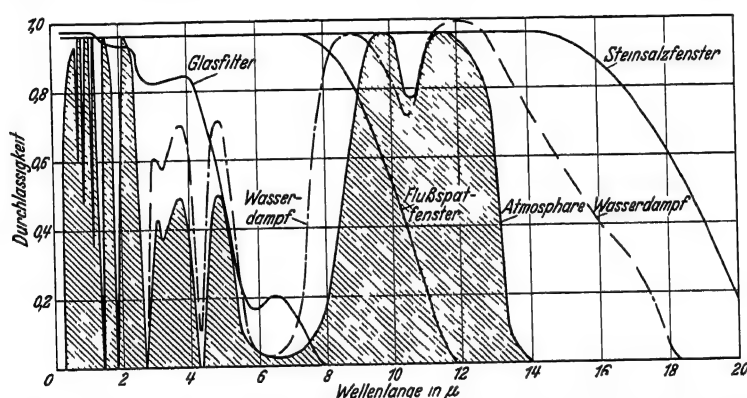


Abb. 38 Die angenommene Durchlässigkeit der Atmosphäre über dem Mt. Wilson in verschiedenen Wellenlängen (Begrenzungskurve der gestrichelten Fläche), sowie Transmissionskurven des Wasserdampfes und einiger bei den thermoelektrischen Untersuchungen verwendeten Filter [Ap. J. 71 (1930)]

und bolometrische Helligkeit zusammenfallen. Im System des Mt. Wilson wird der Klammerausdruck gleich 0,9 gesetzt. Es ist einleuchtend, daß eine Bestimmung der Korrektur Δm_r mit großen Schwierigkeiten verknüpft ist, ein ähnliches, aber fast unlösbares Problem, wie es schon bei der in den Abschnitten d) bis f) behandelten Ermittlung extraterrestrischer Strahlungsweite der Sonne aufgetreten ist. Die Mt. Wilson-Beobachter verwenden ebenso wie die Smithsonian-Beobachter die von F. E. FOWLE¹ ermittelten Transmissionskoeffizienten der Erdatmosphäre. Die aus diesen Daten abgeleitete Transmissionskurve des „Atmosphärenfilters“ ist in Abb. 38 wiedergegeben. Sie ist aber keineswegs als endgültig anzusehen. Noch wesentlich unsicher ist die in der gleichen Abbildung ersichtliche Kurve der Wasserdampfabsorption bei 0,082 cm Dampfdruck, die nur durch eine 900proz. Extrapolation der Laboratoriumsergebnisse gewonnen werden konnte. Wenn man bedenkt, daß eine 50proz. Schwankung des Wasserdampfgehaltes der Luft über dem Mt. Wilson bereits eine 11proz. Änderung des Transmissionskoeffizienten bewirkt, so ist verständlich, daß die 1928 veröffentlichten bolometrischen Helligkeiten² von 124 Fixsternen nur als eine erste Näherung angesehen werden müssen. Dasselbe gilt für die in derselben Arbeit gegebenen

¹ Smithsonian Misc. Coll. 68, Nr. 8 (1917)

² Table III, S. 288 ff. in Ap. J. 68 (1928)

Energiewerte in Kalorien (Beispiele sind in Tab 1, Ziff 1 mitgeteilt), die auf Grund von Laboratoriumseichungen des Empfangers nach Berücksichtigung derselben Korrektur Δm_r abgeleitet worden sind. Die große Bedeutung der thermoelektrischen Messungsergebnisse, soweit es sich um die Bestimmung der radio-metrischen Größen der untersuchten Sterne handelt, wird durch diese Einschränkung nicht angetastet.

In ähnlicher Weise wie bei den Untersuchungen von COBURN¹ sind auch auf der Mt Wilson-Sternwarte mit Hilfe der obengenannten Filter wichtige thermoelektrische Messungen der Planetenstrahlung vorgenommen worden². Bei der Marsopposition 1924³ hatte der Planet im Instrumente einen Durchmesser

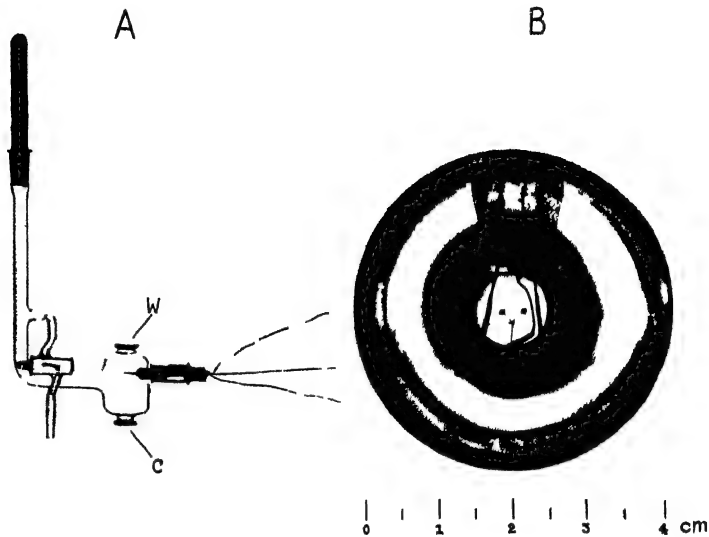


Abb 39 Die 1924 auf dem Mt Wilson bei der Bestimmung der Strahlung des Planeten Mars verwendete thermoelektrische Anordnung. Abbildung A zeigt eine schematische Skizze des Meßgerätes, Abbildung B gibt in natürlicher Größe das im Meßapparat montierte Thermoelement wieder, wie es dem Beobachter im Okular erscheint. [Pop Astr 32 (1924)]

von 1,56 mm, das Empfängerscheibchen einen Durchmesser von 0,2 mm, es bestand demnach keine Schwierigkeit, mehrere Streifen der Planetenoberfläche durchzumessen. In Abb 39A ist das bei den Marsuntersuchungen verwendete Meßgerät schematisch wiedergegeben. Die Strahlung fällt durch das Steinsalzfenster W auf den Empfänger. Durch das Glasfenster C, das sich unmittelbar hinter dem in Abb 36 (S 477) ersichtlichen Okulare E befindet, pointiert man das Planetenbild auf eines der Empfängerscheibchen. Im Okular erscheint dann dem Beobachter das Thermoelement derart, wie in Abb 39B dargestellt. Es sei noch hervorgehoben, daß diese Abbildung den Empfänger in seiner natürlichen Größe zeigt. Die Strahlungsmessungen am West- und Ostrand des Planeten³ ergaben, daß die Marstemperatur der Sonnenstellung folgt und zu Mittag ihr Maximum

¹ Diesbezüglich siehe Beitrag von K GRAFF, Die physische Beschaffenheit des Planetensystems. Ds Handb IV, Kap 4.

² Pop Astr 32, S 601 (1924).

³ A N 225, S 331 (1925).

erreicht Strahlungsmessungen des Merkur wurden 1923¹ und 1925², der dunklen Seite der Venus 1924³ veröffentlicht. Nach den 1926 mitgeteilten Daten über das Mondspektrum im visuellen Gebiete⁴ folgten in den nächsten Jahren weitere Ergebnisse über Strahlungsmessungen des Erdtrabanten. Gelegentlich der Mondfinsternis 1927 Juli 5 ergab sich eine Mondtemperatur von 150°C abs gegenüber 350° vor der Verfinsternung und 110° an der Nachtseite des Mondes⁵. Weitere Untersuchungen über die Temperatur des Mondes sind 1929⁶ und in einer ausführlichen, alle Ergebnisse zusammenfassenden Mitteilung im Jahre 1930⁷ veröffentlicht worden. Bei den Monduntersuchungen, die am Hooker-Teleskop vorgenommen wurden, hatte die Scheibe des Erdtrabanten im Mittel einen Durchmesser von 116,6 mm, das Empfängerscheibchen dagegen einen Durchmesser von etwa $5,5 \cdot 10^{-3}$ Monddurchmesser. Beobachtet wurde die Gesamtstrahlung sowie die Strahlung bei Verwendung der bereits genannten Filter, dem Mikroskopdeckglaschen, dem Flußspatfenster und der Wasserzelle. Alle Messungen sind an einen Stein bekannter radiometrischer Helligkeit angeschlossen. Es ist dann die radiometrische Helligkeit des reflektierten Sonnenlichtes $-13^{\text{m}},3$ und die radiometrische Helligkeit der gesamten vom Monde emittierten Strahlung $-14^{\text{m}},8$.

Der große Gewinn der thermoelektrischen Untersuchungen besteht darin, daß es unter Verwendung der entsprechenden Filter möglich ist, die beiden Hauptkomponenten der Strahlung des Mondes und der Planeten zu erfassen, einerseits das Gebiet zwischen $\lambda 3000$ und $\lambda 50000$ (5μ), das im wesentlichen die reflektierte Sonnenstrahlung, andererseits die „kühle Planetenstrahlung“, das von den atmosphärischen Wasserdampfbanden (s. Abb. 38) verhältnismaäßig ungestörte Spektralgebiet zwischen $\lambda 80000$ und 140000 (8 bis 14μ).

j) Die Messung der Energieverteilung in den Sternspektren mit Hilfe des Bolometers

34 Die Anordnung der Mt Wilson-Versuche von 1922 Die ersten Ansätze zu einer spektralen Zerlegung der Gesamtstrahlung der Fixsterne findet sich in den im Abschnitt i) dargelegten thermoelektrischen Untersuchungen mit Verwendung einiger selektiver Filter. Dies gilt vor allem für die in Ziff. 31 genannten 16 von COBURN⁸ untersuchten Sterne. Naturgemäß können aber erst Gesamtstrahlungsinstrumente in Verbindung mit einem Spektralapparat den Lauf der Energiekurve festlegen. Es waren C. G. ABBOT, F. E. FOWLE und L. B. ALDRICH, die auf Grund der Erfahrungen bei der Bestimmung der Energiekurve der Sonne (s. Ziff. 14) als erste den Versuch gemacht haben, mit Hilfe des Spektrobolometers analoge Untersuchungen nunmehr auch an den Fixsternen vorzunehmen. Der Plan geht auf das Jahr 1916 zurück, wurde jedoch erst im Sommer 1922 ausgeführt⁹. Vorbedingung dafür war die Anfertigung eines Galvanometers geringen Widerstandes und hoher Empfindlichkeit und eines verläßlich arbeitenden Vakuum-Bolometers. Die Arbeiten konnten mit dem 100-Zoller der Mt Wilson-Sternwarte ausgeführt werden und hatten eine Untersuchung von zehn hellen Sternen verschiedener Spektralklassen zum Ziele. Es war von vornherein klar, daß diese ersten Versuche nur ungefähre Werte der Energieverteilung in

¹ Publ. A. S. P. 35, S. 101 (1923) ² Pop. Astr. 33, S. 299 (1925)

³ Publ. A. S. P. 36, S. 227 (1924) Pop. Astr. 32, S. 614 (1924)

⁴ Publ. A. S. P. 38, S. 212 (1926) ⁵ Publ. A. S. P. 39, S. 227 (1927)

⁶ Pop. Astr. 37, S. 322 (1929), Phys. Rev. (2) 33, S. 273 (1929), s. auch Planetary Temperatures Interpreted from the Radiation of the Moon and of Mercury. Publ. A. S. P. 41, S. 257 (1929)

⁷ Ap. J. 71, S. 102 (1930)

⁸ Mt. Wilson Ann. Rep. 1922, S. 204 u. 239, Smithsonian Ann. 4, S. 59 (1922), 5, S. 15 (1932)

den Spektren geben können. Verwendet wurde ein spezielles Vakuum-Bolometer¹ (s auch Ziff 12) und ein hochempfindliches Spiegelgalvanometer von 11 Ohm Widerstand. Es konnten Ströme von $5 \cdot 10^{-12}$ Amp gemessen werden, bzw in Verbindung mit dem Bolometer eine Temperaturänderung von $1 \cdot 10^{-8}^{\circ}\text{C}$. Die Beobachter erkannten, daß für zukünftige Untersuchungen die Empfindlichkeit mindestens um eine Zehnerpotenz größer sein mußte.

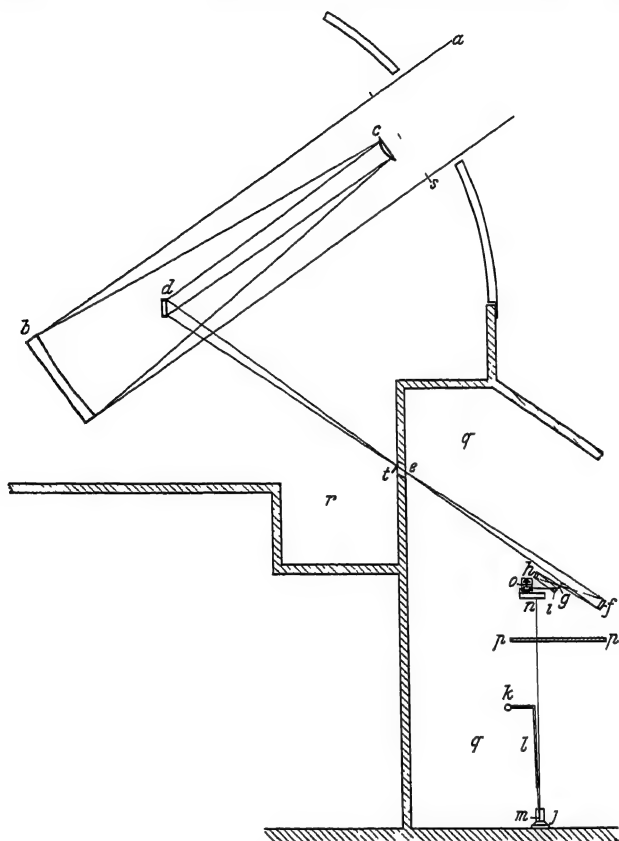


Abb 40 Spektrobolometrische Messung der Energieverteilung in den Sternspektren. Die instrumentelle Anordnung ABBOTS am 100 Zoller der Mt Wilson-Sternwarte bei den Versuchen von 1922 [Smithson Misc Coll 74 (1923)]

Die gewählte Anordnung² ersieht man aus Abb 40. Die einfallende Strahlung wird zuerst vom Spiegel des 100-Zollers *b* auf einen im Brennpunkte befindlichen Konkavspiegel *c* geworfen, der die Brennweite des Instrumentes rund sechsfacht. Ein ebener Spiegel *d* vereinigt die Strahlen in dem Coudé-Fokus *e*, welcher letzterer in der südlichen Verlängerung der Aquatorialachse des Fernrohrs gelegen ist. An dieser Stelle treten die Strahlen aus der Kuppel *r* in den Raum *q* ein, der auf einigermaßen konstanter Temperatur zu halten war. 6 m hinter dem Coudé-Brennpunkt ist der Konkavspiegel *j* von 1 m Brennweite angebracht. In der Brennebene liegt der Spalt *g*. Die Strahlen erreichen nach Passieren des Spaltes den Kolliimatorspiegel *h*. Nun werden die Strahlen durch ein 18° -UV-Kron-

glasprisma gelenkt und gelangen schließlich in das Bolometer, das nahe dem Spalt *g* angebracht ist. Auf der Plattform *pp* konnte das Bolometer bedient werden, das mit dem Galvanometer *g* verbunden war. Der vom Galvanometer-Spiegel *m* reflektierte Lichtstrahl der Lampe *k* fällt auf die photographische Registrervorrichtung, die bei *n* montiert ist. Das Uhrwerk *o* vermittelte die gleichzeitige Bewegung von Prisma und Platte. Es hat sich aber bald herausgestellt, daß die Unruhe des Galvanometers, die ständig Schwankungen von 1 bis 5 mm verursachte, die Verwendung der Registrervorrichtung undurchführbar machte. Die Beobachtungen sind dann visuell durchgeführt worden, wobei die

¹ Smithson Ann 4, S 45 u 59ff. (1920)

² Smithson Misc Coll 74, Nr 7 (1923)

Ablese skala in einer Distanz von 5 m vom Galvanometerspiegel auf der Plattform $\beta\beta$ angebracht wurde

35 Der Beobachtungsvorgang. Beobachtet wurde in Zenitdistanzen bis zu 50° , die Luftmasse war daher niemals größer als 1,5. Immerhin sind so nennenswerte Verluste durch den Einfluß der Atmosphäre zu erwarten, die nicht leicht zu eliminieren sind. Bei derartigen Messungen sollte man wohl nicht unter 30° Zenitdistanz herabgehen. Den Energieverlust, der sich aus der selektiven Absorption der Atmosphäre und aus der Wirkung der zahlreichen optischen Teile

der Anordnung ergab, suchte man durch einen etwas verwickelten Beobachtungsvorgang kennenzulernen. Einmal wurde mit derselben Apparatur eine Sonnenbeobachtung vorgenommen und so ein Reduktionsfaktor auf die Sternintensitäten ermittelt. Der zweite Schritt bestand darin, daß man diese Sonnenbeobachtungen mit den 1920 vorgenommenen Bestimmungen (s. Ziff 14) der Gestalt der Sonnenenergiekurve für prismatisches und normales Spektrum außerhalb der Atmosphäre in Verbindung setzte. Abbot und sein Mitarbeiter glauben auf diesem Wege die selektiven Absorptionseffekte bei den Messungen der Sternspektren ermittelt zu haben. Bei der Sonnenbeobachtung wurde folgende Anordnung getroffen. Bei schob man eine Blende mit acht symmetrisch angeordneten Öffnungen von $\frac{1}{4}$ " Durchmesser ein und bei t eine zweite Blende von $\frac{1}{8}$ Zoll (Abb 40). Auf diese Weise war es möglich, die Sonnenbeobachtung

mit demselben Galvanometer vorzunehmen. Bei den Sternbeobachtungen wurde zuerst mit Hilfe einer Natriumflamme die D -Linie auf das Bolometer gebracht und dann sogleich mit der Untersuchung des Sternspektrums begonnen. Der eine Beobachter stellte das Prisma der Reihe nach in verschiedene Stellungen und betätigte zugleich den bei t angebrachten Verschuß, dem anderen Beobachter oblag die Ablesung der Galvanometerausschläge. War das Spektrum in einer Richtung durchgelaufen, so wurden die Beobachtungen in der entgegengesetzten Richtung wiederholt, wobei die Ablesungen in den Zwischenstellungen der ersten Serie vorgenommen wurden.

Es ergab sich, daß die Versuche nur in den frühen Morgenstunden durchführbar waren, da sich zu anderen Zeiten der Nacht Störungen durch die elektrischen Kraftwerke in Pasadena und Los Angeles fühlbar machten. Positive Ergebnisse konnten nur in drei Nächten gewonnen werden. In Abb 41 sind gemittelte Kurven für die von den Autoren angenommene Energieverteilung außerhalb der Atmosphäre in der Skala des prismatischen Spektrums wiedergegeben. Die

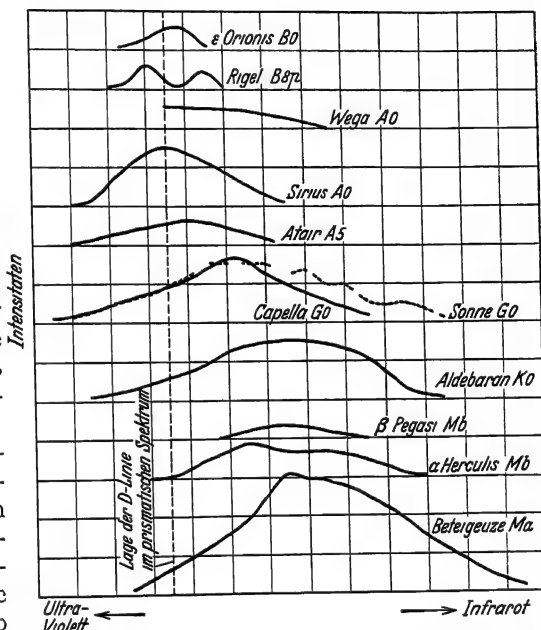


Abb 41 Spektrobolometrische Messung der Energieverteilung in den Sternspektren. Gemittelte Kurven der extraterrestrischen Energieverteilung in der Skala des 36° UV-Kronglas-Prismas (Mt Wilson-Versuche aus dem Jahre 1922) [Smithson Misc Coll 74 (1923)].

Energiekurven, die sich nach der Umrechnung des prismatischen Spektrums auf das normale Spektrum ergeben, sind nicht verläßlich. Es zeigte sich, daß für die Typen B bis G die Ausschläge in den kürzeren Wellenlängen zu klein waren, um sichere Werte nach der Multiplikation mit dem großen prismatischen Dispersionsfaktor zu liefern. Demgemäß sind auch die Energiemaxima für diese Sterne ganz unsicher. Abgesehen davon war die Genauigkeit der Einzelmessungen nur gering. Mitunter ergaben sich die früher genannten Oszillationen des Galvanometers von derselben Größenordnung wie der maximale Ausschlag im Spektrum.

Zweifelloos ist die Verwendung des Bolometers zur Messung der Energieverteilung in Sternspektren viel zu ungenau. Sie ist auch später nicht mehr wieder versucht worden. Immerhin verdienen die ABBOTSchen Untersuchungen des Jahres 1922 als erster Versuch auf diesem Gebiete volle Anerkennung, insbesondere wenn man bedenkt, daß die Empfindlichkeit gegenüber früheren Anordnungen ganz wesentlich gesteigert werden konnte. Bei den Versuchen von NICHOLS (Ziff 28) ergaben sich Ausschläge von 1 bis 2 mm bei der Messung der Gesamtstrahlung, bei den ABBOTSchen Versuchen für α O 11 Ausschläge von 1 bis 33 mm in 20 verschiedenen Wellenlängen des Spektrums dieses Sternes. Über die Versuche von W W COBLENTZ¹ mit Thermoelementen und verschiedenen Filtern, die einzelne breitere Spektralbereiche erfaßt haben, ist bereits in Ziff 31 berichtet worden.

k) Die Messung der Energieverteilung in den Sternspektren mit Hilfe des Radiometers

36. Erste Versuche und Reduktionsmethoden Die bolometrischen Energiemessungen in Fixsternspektren, wie sie 1922 von ABBOT, FOWLE und ALDRICH ausgeführt wurden (s. vorige Ziffer), haben wohl zum erstenmal positive Ergebnisse für einige Sterne gebracht, waren aber, wie erwähnt, nur von geringer Genauigkeit und

nur als erster Versuch zu werten. Es erschien erfolgversprechender zu sein, statt eines Bolometers ein Radiometer heranzuziehen, insbesondere als die seinerzeit (1898) von NICHOLS auf dem Yerkes-Observatorium verwendete Konstruktion ausbaufähig war. Es ist dann auch nach den Angaben von NICHOLS von I D TEAR ein neues Radiometer konstruiert worden², das dem genannten ersten Radiometer NICHOLS' etwa 15fach überlegen war. Dieses Radiometer wurde ABBOT zur Verfügung gestellt. Durch Verlegung der Versuche auf den Mt. Wilson mit seiner großen Luftdurch-

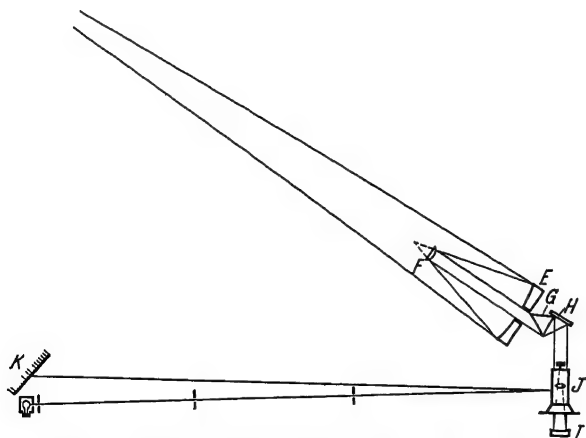


Abb 42 Radiometrische Messung der Energieverteilung in den Sternspektren. Die instrumentelle Anordnung am 100 Zoller der Mt. Wilson-Sternwarte bei den ersten 1923 vorgenommenen Versuchen (ABBOT, ADAMS, PETTIT und NICHOLSON) [Ap J 60 (1924)]

¹ Bur of Stand Bull 17, S 725 (1922), Wash Nat Ac Proc 8, S 49 (1922)

² Smithsonian Ann 5, S 23 (1932)

sichtigkeit, durch Verwendung des Hooker-Teleskops und schließlich durch eine Verdreifachung der Distanz der Meßskala konnte der endgültige Gewinn an Empfindlichkeit gegenüber der Yerkes-Anordnung auf rund das 10^3 -fache veranschlagt werden

Das Radiometer¹ besaß Flügel von 1,5 mm Höhe und 0,5 mm Breite, ihr gegenseitiger Abstand betrug 2,5 mm. In ähnlicher Weise wie bei den ersten Versuchen mit dem Bolometer wurde wieder in der Coude-Anordnung des 100-Zollers gearbeitet. 16 m außerhalb des Coudé-Fokus des Hooker-Teleskops ist ein durchbohrter Konkavspiegel *E* (s. Abb. 42) von 50 cm Öffnung und 100 cm Brennweite aufgestellt, 20 cm innerhalb des Brennpunktes befindet sich der kleine Konvexspiegel *F*. Durch die Ausbohrung von 10 cm Durchmesser des Spiegels *E* fällt ein paralleles Strahlenbündel auf das im Minimum der Ablenkung montierte 60°-Flintglasprisma *G*. Es ist im übrigen dasselbe Prisma, das von ABBOT auch bei den bolometrischen Messungen an der Sonne verwendet wurde. Nach Durchlaufen des Prismas fallen die Strahlen auf den ebenen Spiegel *H* und werden dann auf einen konkaven Spiegel *I* von 45 cm Brennweite gelenkt. Nahe dem Brennpunkt von *I* ist noch ein um 45° geneigter Planspiegel (deutlicher zu erkennen auf Abb. 45, S. 494, der verbesserten Konstruktion von 1928) montiert, der die Strahlen schließlich in horizontaler Richtung den Flügeln des Radiometers *J* zuführt.

Von großer Wichtigkeit für das Gelingen der Versuche war die Anordnung von Ablese-skala und Beleuchtungslampe. Trotzdem das Spiegelchen am Radiometer nur eine Fläche von nicht ganz 2 mm² besaß, konnte schließlich die Skala *K* noch in einer Entfernung von 5 m abgelesen werden. Alles Nebenlicht war ausgeschaltet, das Licht der Skalenbeleuchtung wurde durch mehrere Blenden von 2 mm Öffnung dem Radiometerspiegel zugeführt.

Der Beobachter an der Meßskala bediente zugleich eine Schraube, die mittels Übertragungsstangen die Drehung des Prismas bewerkstelligte. Eine Schraubenrevolution bewirkte eine Drehung von 21'. Es wurden 15 verschiedene Einstellungen innerhalb des Spektralbereiches von λ 4370 bis λ 22 240 verwendet.

¹ Mit Wilson Contr. Nr. 280 = Ap J. 60, S. 87 (1924)

Tabelle 8 Die Radiometerausschläge der 10 Sterne in verschiedenen Wellenlängen
(Erste Versuche ABBOTS aus dem Jahre 1923)

Orientierung d. prism. Spektrums Wellenlänge λ	-6 4370	-5 4400	-4 4420	-3 4440	-2 4460	-1 4480	D 4500	-1 4520	-2 4540	-3 4560	-4 4580	-5 4600	-6 4620	-7 4640	-8 4660	-9 4680	-10 4700	-11 4720	-12 4740	-13 4760	-14 4780	-15 4800	-16 4820	-17 4840	-18 4860	-19 4880	-20 4900	-21 4920	-22 4940	-23 4960	-24 4980	-25 5000	-26 5020	-27 5040	-28 5060	-29 5080	-30 5100	-31 5120	-32 5140	-33 5160	-34 5180	-35 5200	-36 5220	-37 5240	-38 5260	-39 5280	-40 5300	-41 5320	-42 5340	-43 5360	-44 5380	-45 5400	-46 5420	-47 5440	-48 5460	-49 5480	-50 5500	-51 5520	-52 5540	-53 5560	-54 5580	-55 5600	-56 5620	-57 5640	-58 5660	-59 5680	-60 5700	-61 5720	-62 5740	-63 5760	-64 5780	-65 5800	-66 5820	-67 5840	-68 5860	-69 5880	-70 5900	-71 5920	-72 5940	-73 5960	-74 5980	-75 6000	-76 6020	-77 6040	-78 6060	-79 6080	-80 6100	-81 6120	-82 6140	-83 6160	-84 6180	-85 6200	-86 6220	-87 6240	-88 6260	-89 6280	-90 6300	-91 6320	-92 6340	-93 6360	-94 6380	-95 6400	-96 6420	-97 6440	-98 6460	-99 6480	-100 6500	-101 6520	-102 6540	-103 6560	-104 6580	-105 6600	-106 6620	-107 6640	-108 6660	-109 6680	-110 6700	-111 6720	-112 6740	-113 6760	-114 6780	-115 6800	-116 6820	-117 6840	-118 6860	-119 6880	-120 6900	-121 6920	-122 6940	-123 6960	-124 6980	-125 7000	-126 7020	-127 7040	-128 7060	-129 7080	-130 7100	-131 7120	-132 7140	-133 7160	-134 7180	-135 7200	-136 7220	-137 7240	-138 7260	-139 7280	-140 7300	-141 7320	-142 7340	-143 7360	-144 7380	-145 7400	-146 7420	-147 7440	-148 7460	-149 7480	-150 7500	-151 7520	-152 7540	-153 7560	-154 7580	-155 7600	-156 7620	-157 7640	-158 7660	-159 7680	-160 7700	-161 7720	-162 7740	-163 7760	-164 7780	-165 7800	-166 7820	-167 7840	-168 7860	-169 7880	-170 7900	-171 7920	-172 7940	-173 7960	-174 7980	-175 8000	-176 8020	-177 8040	-178 8060	-179 8080	-180 8100	-181 8120	-182 8140	-183 8160	-184 8180	-185 8200	-186 8220	-187 8240	-188 8260	-189 8280	-190 8300	-191 8320	-192 8340	-193 8360	-194 8380	-195 8400	-196 8420	-197 8440	-198 8460	-199 8480	-200 8500	-201 8520	-202 8540	-203 8560	-204 8580	-205 8600	-206 8620	-207 8640	-208 8660	-209 8680	-210 8700	-211 8720	-212 8740	-213 8760	-214 8780	-215 8800	-216 8820	-217 8840	-218 8860	-219 8880	-220 8900	-221 8920	-222 8940	-223 8960	-224 8980	-225 9000	-226 9020	-227 9040	-228 9060	-229 9080	-230 9100	-231 9120	-232 9140	-233 9160	-234 9180	-235 9200	-236 9220	-237 9240	-238 9260	-239 9280	-240 9300	-241 9320	-242 9340	-243 9360	-244 9380	-245 9400	-246 9420	-247 9440	-248 9460	-249 9480	-250 9500	-251 9520	-252 9540	-253 9560	-254 9580	-255 9600	-256 9620	-257 9640	-258 9660	-259 9680	-260 9700	-261 9720	-262 9740	-263 9760	-264 9780	-265 9800	-266 9820	-267 9840	-268 9860	-269 9880	-270 9900	-271 9920	-272 9940	-273 9960	-274 9980	-275 10000	-276 10020	-277 10040	-278 10060	-279 10080	-280 10100	-281 10120	-282 10140	-283 10160	-284 10180	-285 10200	-286 10220	-287 10240	-288 10260	-289 10280	-290 10300	-291 10320	-292 10340	-293 10360	-294 10380	-295 10400	-296 10420	-297 10440	-298 10460	-299 10480	-300 10500	-301 10520	-302 10540	-303 10560	-304 10580	-305 10600	-306 10620	-307 10640	-308 10660	-309 10680	-310 10700	-311 10720	-312 10740	-313 10760	-314 10780	-315 10800	-316 10820	-317 10840	-318 10860	-319 10880	-320 10900	-321 10920	-322 10940	-323 10960	-324 10980	-325 11000	-326 11020	-327 11040	-328 11060	-329 11080	-330 11100	-331 11120	-332 11140	-333 11160	-334 11180	-335 11200	-336 11220	-337 11240	-338 11260	-339 11280	-340 11300	-341 11320	-342 11340	-343 11360	-344 11380	-345 11400	-346 11420	-347 11440	-348 11460	-349 11480	-350 11500	-351 11520	-352 11540	-353 11560	-354 11580	-355 11600	-356 11620	-357 11640	-358 11660	-359 11680	-360 11700	-361 11720	-362 11740	-363 11760	-364 11780	-365 11800	-366 11820	-367 11840	-368 11860	-369 11880	-370 11900	-371 11920	-372 11940	-373 11960	-374 11980	-375 12000	-376 12020	-377 12040	-378 12060	-379 12080	-380 12100	-381 12120	-382 12140	-383 12160	-384 12180	-385 12200	-386 12220	-387 12240	-388 12260	-389 12280	-390 12300	-391 12320	-392 12340	-393 12360	-394 12380	-395 12400	-396 12420	-397 12440	-398 12460	-399 12480	-400 12500	-401 12520	-402 12540	-403 12560	-404 12580	-405 12600	-406 12620	-407 12640	-408 12660	-409 12680	-410 12700	-411 12720	-412 12740	-413 12760	-414 12780	-415 12800	-416 12820	-417 12840	-418 12860	-419 12880	-420 12900	-421 12920	-422 12940	-423 12960	-424 12980	-425 13000	-426 13020	-427 13040	-428 13060	-429 13080	-430 13100	-431 13120	-432 13140	-433 13160	-434 13180	-435 13200	-436 13220	-437 13240	-438 13260	-439 13280	-440 13300	-441 13320	-442 13340	-443 13360	-444 13380	-445 13400	-446 13420	-447 13440	-448 13460	-449 13480	-450 13500	-451 13520	-452 13540	-453 13560	-454 13580	-455 13600	-456 13620	-457 13640	-458 13660	-459 13680	-460 13700	-461 13720	-462 13740	-463 13760	-464 13780	-465 13800	-466 13820	-467 13840	-468 13860	-469 13880	-470 13900	-471 13920	-472 13940	-473 13960	-474 13980	-475 14000	-476 14020	-477 14040	-478 14060	-479 14080	-480 14100	-481 14120	-482 14140	-483 14160	-484 14180	-485 14200	-486 14220	-487 14240	-488 14260	-489 14280	-490 14300	-491 14320	-492 14340	-493 14360	-494 14380	-495 14400	-496 14420	-497 14440	-498 14460	-499 14480	-500 14500	-501 14520	-502 14540	-503 14560	-504 14580	-505 14600	-506 14620	-507 14640	-508 14660	-509 14680	-510 14700	-511 14720	-512 14740	-513 14760	-514 14780	-515 14800	-516 14820	-517 14840	-518 14860	-519 14880	-520 14900	-521 14920	-522 14940	-523 14960	-524 14980	-525 15000	-526 15020	-527 15040	-528 15060	-529 15080	-530 15100	-531 15120	-532 15140	-533 15160	-534 15180	-535 15200	-536 15220	-537 15240	-538 15260	-539 15280	-540 15300	-541 15320	-542 15340	-543 15360	-544 15380	-545 15400	-546 15420	-547 15440	-548 15460	-549 15480	-550 15500	-551 15520	-552 15540	-553 15560	-554 15580	-555 15600	-556 15620	-557 15640	-558 15660	-559 15680	-560 15700	-561 15720	-562 15740	-563 15760	-564 15780	-565 15800	-566 15820	-567 15840	-568 15860	-569 15880	-570 15900	-571 15920	-572 15940	-573 15960	-574 15980	-575 16000	-576 16020	-577 16040	-578 16060	-579 16080	-580 16100	-581 16120	-582 16140	-583 16160	-584 16180	-585 16200	-586 16220	-587 16240	-588 16260	-589 16280	-590 16300	-591 16320	-592 16340	-593 16360	-594 16380	-595 16400	-596 16420	-597 16440	-598 16460	-599 16480	-600 16500	-601 16520	-602 16540	-603 16560	-604 16580	-605 16600	-606 16620	-607 16640	-608 16660	-609 16680	-610 16700	-611 16720	-612 16740	-613 16760	-614 16780	-615 16800	-616 16820	-617 16840	-618 16860	-619 16880	-620 16900	-621 16920	-622 16940	-623 16960	-624 16980	-625 17000	-626 17020	-627 17040	-628 17060	-629 17080	-630 17100	-631 17120	-632 17140	-633 17160	-634 17180	-635 17200	-636 17220	-637 17240	-638 17260	-639 17280	-640 17300	-641 17320	-642 17340	-643 17360	-644 17380	-645 17400	-646 17420	-647 17440	-648 17460	-649 17480	-650 17500	-651 17520	-652 17540	-653 17560	-654 17580	-655 17600	-656 17620	-657 17640	-658 17660	-659 17680	-660 17700	-661 17720	-662 17740	-663 17760	-664 17780	-665 17800	-666 17820	-667 17840	-668 17860	-669 17880	-670 17900	-671 17920	-672 17940	-673 17960	-674 17980	-675 18000	-676 18020	-677 18040	-678 18060	-679 18080	-680 18100	-681 18120	-682 18140	-683 18160	-684 18180	-685 18200	-686 18220	-687 18240	-688 18260	-689 18280	-690 18300	-691 18320	-692 18340	-693 18360	-694 18380	-695 18400	-696 18420	-697 18440	-698 18460	-699 18480	-700 18500	-701 18520	-702 18540	-703 18560	-704 18580	-705 18600	-706 18620	-707 18640	-708 18660	-709 18680	-710 18700	-711 18720	-712 18740	-713 18760	-714 18780	-715 18800	-716 18820	-717 18840	-718 18860	-719 18880	-720 18900	-721 18920	-722 18940	-723 18960	-724 18980	-725 19000	-726 19020	-727 19040	-728 19060	-729 19080	-730 19100	-731 19120	-732 19140	-733 19160	-734 19180	-735 19200	-736 19220	-737 19240	-738 19260	-739 19280	-740 19300	-741 19320	-742 19340	-743 19360	-744 19380	-745 19400	-746 19420	-747 19440	-748 19460	-749 19480	-750 19500	-751 19520	-752 19540	-753 19560	-754 19580	-755 19600	-756 19620	-757 19640	-758 19660	-759 19680	-760 19700	-761 19720	-762 19740	-763 19760	-764 19780	-765 19800	-766 19820	-767 19840	-768 19860	-769 19880	-770 19900	-771 19920	-772 19940	-773 19960	-774 19980	-775 20000	-776 20020	-777 20040	-778 20060	-779 20080	-780 20100	-781 20120	-782 20140	-783 20160	-784 20180	-785 20200	-786 20220	-787 20240	-788 20260	-789 20280	-790 20300	-791 20320	-792 20340	-793 20360	-794 20380	-795 20400	-796 20420	-797 20440	-798 20460	-799 20480	-800 20500	-801 20520	-802 20540	-803 20560	-804 20580	-805 20600	-806 20620	-807 20640	-808 20660	-809 20680	-810 20700	-811 20720	-812 20740	-813 20760	-814 20780	-815 20800	-816 20820	-817 20840	-818 20860	-819 20880	-820 20900	-821 20920	-822 20940	-823 20960	-824 20980	-825 21000	-826 21020	-827 21040	-828 21060	-829 21080	-830 21100	-831 21120	-832 21140	-833 21160	-834 21180	-835 21200	-836 21220	-837 21240	-838 21260	-839 21280	-840 21300	-841 21320	-842 21340	-843 21360	-844 21
---	------------	------------	------------	------------	------------	------------	-----------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	------------

Bei jeder Einstellung wurde 15 Sekunden belichtet, ebenso lang der Verschuß verschlossen gehalten und dieser Vorgang noch weitere 7mal wiederholt, wobei die Galvanometeraussschläge sowohl bei Belichtung, als auch bei der Verdunkelung abgelesen wurden. Die Messungen begannen bei der kürzesten Wellenlänge, die noch gerade einen Ausschlag ergab, sodann wurde das Spektrum in den 14 übrigen Stellungen untersucht und nach Durchlaufen desselben vom infraroten Bereiche aus noch einmal wieder zu den kurzen Wellenlängen zurückgemessen. Derart beruhen, soweit nicht, wie etwa bei α Ori und α CMa, schon einige wenige Ausschläge genugten, die Ergebnisse für eine Wellenlänge (s. Tab 8) im allgemeinen auf 16 Einzelwerten.

Die Untersuchungen beschränkten sich auf nur vier Nächte, die beiden mittleren hatten ungünstige Luftverhältnisse und zeigten unbefriedigende Ergebnisse. Die erste und die vierte Nacht waren sehr klar, doch arbeitete in der ersten Nacht die Apparatur nicht ganz zuverlässig. Immerhin konnten für α Ori, β Ori, α Lyr, α CMa, α CMi, α Aur, α Tau, β Peg einigemaßen verwendbare prismatische Energiekurven abgeleitet werden. Zur Reduktion der Beobachtungen auf Wellenlängen und zur Berücksichtigung der atmosphärischen Extinktion benutzte ABBOT die Ergebnisse seiner früheren Arbeit auf dem Mt Wilson¹, wobei die durchlaufene Luftmasse bei allen Sternen zu 1,3 angenommen wurde. Die Energieverteilung im Normalspektrum außerhalb der Atmosphäre hat man folgendermaßen ermittelt. Vorerst wurden die früher am 100-Zoller gewonnenen Sonnenbeobachtungen (s. Ziff 35), reduziert auf Luftmasse 1,3, mit den 1920 ermittelten Werten (Ziff 14) der extraterrestrischen Energieverteilung im Sonnenspektrum verglichen. Mit Hilfe dieser Reduktionsfaktoren, die im übrigen noch ausgeglichen wurden, sind dann die beobachteten Energieverteilungen in den Sternspektren in extraterrestrische Energiekurven verwandelt worden (Tab 9). Dem hier gewählten Umweg, bei welchem Messungen

Tabelle 9 Radiometermessungen. Koordinaten der extraterrestrischen Energiekurve des Normalspektrums der 10 Sterne.
(Erste Versuche ABBOTS aus dem Jahre 1923)

Wellenlänge λ	4370	4720	5200	5890	7000	9050	13160	17510	22210
Sonne	490	310	573	466	388	223	106	55	16
β Ori		0(?)	469	226	125	123	0(?)		
α Lyr		1432	1440	602	173				
α CMa			1776	1448	1114	443	177	82	35
α CMi				113	365	156	75	101	38
α Aur			703	470	298	303	152	63	15
α Tau				56	374	508	405	277	95
β Peg				75	144	205	167	132	72
α Ori				378	614	1132	1202	918	407
α Her				0(?)	278	307	537	498	140

an der Sonne und an Sternen aus verschiedenen Jahren zur Lösung der an und für sich so schwierigen Extrapolationsaufgabe aufeinander bezogen werden, kann nicht voll beigepröftet werden. Der Zweifel ist wohl berechtigt, ob nunmehr tatsächlich extraterrestrische Energieverteilungen vorliegen. Sieht man davon ab, daß es sich um Absolutwerte handeln soll, so sind die Ergebnisse als nennenswerter Fortschritt gegenüber den bolometrischen Untersuchungen von größter Bedeutung. Die erhöhte Meßgenauigkeit gestattet nun auch, die relativen Verhältnisse der Energiekurven von Sternen verschiedener Spektralklasse schon besser zu erkennen, am deutlichsten, wenn man wieder auf die ursprüng-

¹ Tabelle 16 bzw 17 in Smithsonian Ann 2, S 105 u 110 (1908)

lichen prismatischen Energiekurven zurückgeht, wie sie in Abb 43 wiedergegeben sind. Die mit dem Radiometer gewonnenen Energiekurven lassen sich durch die PLANCK'sche Formel in Farbtemperaturen überführen. ABBOT hat seine Ergebnisse an die spektralphotometrischen Wertereihen, die ROSENBERG¹ im photographischen Bereiche, WILSING, SCHEINER und MUNCH² im visuellen Bereiche erhalten haben, angeschlossen. Nach Daten, die sich für die gemeinsamen Spektralbezirke ergeben, ist der Anschluß befriedigend ausgefallen. Die

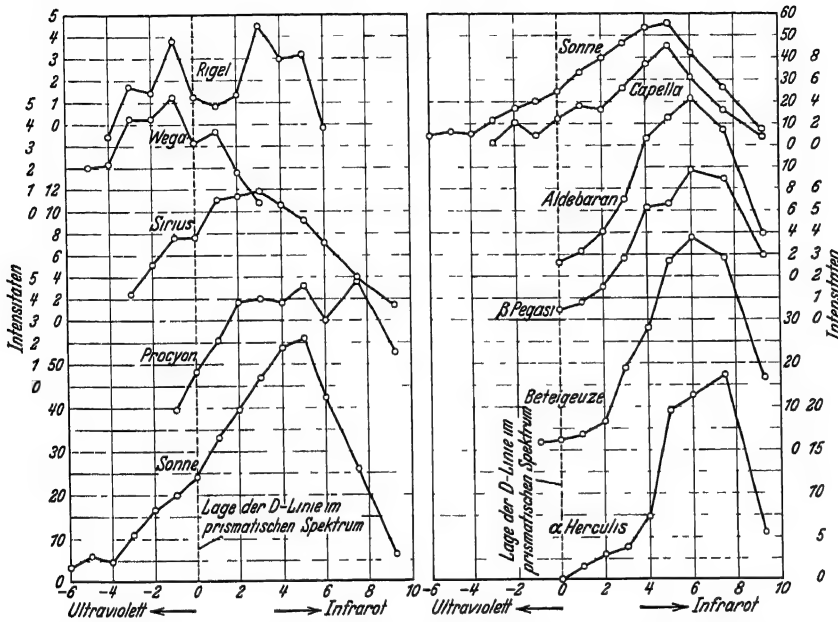


Abb 43 Radiometrische Messungen der Energieverteilung in den Sternspektren. Prismatische Energiekurven nach den ersten Mt Wilson-Versuchen des Jahres 1923 [Ap J 60 (1924)]

derart aus den radiometrischen Untersuchungen des Jahres 1924 folgenden Farbtemperaturen sind bei A. BRILL³ in der Tabelle 5 unter dem Kopf „ABBOT“ wiedergegeben.

37 Die neuen Radiometermessungen von C G ABBOT Die in der vorhergehenden Ziffer genannten, 1923 auf dem Mt Wilson vorgenommenen Untersuchungen haben noch keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielen lassen, die gewählte Anordnung war aber an und für sich erfolgversprechend, sobald eine Steigerung der Empfindlichkeit des Radiometers und eine Verbesserung des Meßvorganges selbst durchführbar erschien. Im Jahre 1926 wurde von ABBOT ein neues Radiometer konstruiert⁴, das bereits höhere Empfindlichkeit besaß. Hier sind die Radiometerflügel aus Glimmer durch Flügel der Hausfliege ersetzt worden, deren Distanz nur 1 mm betrug. Auch der Spiegel wurde verkleinert und leichter gemacht. Er besteht nunmehr aus einem Mikroskopdeckglaschen von 1 mm² Fläche. Eine Prüfung des neuen Instrumentes an α Ori

¹ Abh d Kais Leop-Carol Dtsch Akad d Naturf Nova Acta Halle 1914, 101, Nr 2

² Potsdam Publ Nr 74 (1919), s auch ds Handb Beiträge von A. BRILL, II/1, Kap 2, W E BERNHEIMER, IV, Kap 1

³ Ds Handb V/1, Kap 3, S 150 (1932)

⁴ Ap J 69, S 293 (1929), Smithsonian Ann 5, S 38, 47 u 97 (1932)

ergab wesentlich gesteigerte Empfindlichkeit. Es zeigte sich jedoch, daß die Ausschläge sehr unbestimmt waren, da die Luft unter dem für den Radiometer-effekt erforderlichen Drucke eine zu starke Dampfung verursachte. Es wurde daher 1927 eine Abänderung vorgenommen dahingehend, daß die Füllung nunmehr auf Grund eines Vorschlages von ANDERSON mit Wasserstoff erfolgte. Das neue Radiometer hatte einen Flügelabstand von 1,2, in einem zweiten Exemplar von 2,0 mm, jeder Flügel war 1 mm hoch und 0,4 mm breit. Eichungen der Radiometer an einem Bolometer ergaben, daß die wasserstoffgefüllten Instrumente wohl einen etwas geringeren Radiometereffekt zeigten als die luftgefüllten, daß aber anderseits dieser Nachteil ganz wesentlich durch eine Verringerung der Dampfung ausgeglichen wurde. Der Gewinn in den Ausschlägen ist nunmehr ungefähr auf das 10fache gestiegen.

Jeder Radiometerflügel bestand aus drei Fliegenflügeln, deren vorderster geschwärzt war und deren gegenseitiger Abstand nur 0,1 mm betrug. Das Gesamtgewicht belief sich auf 0,035 mg. Dazu kam noch eine Verbindungsglasfaser von 0,023 mg. Diese war an einem 10 cm langen Quarzfaden befestigt.

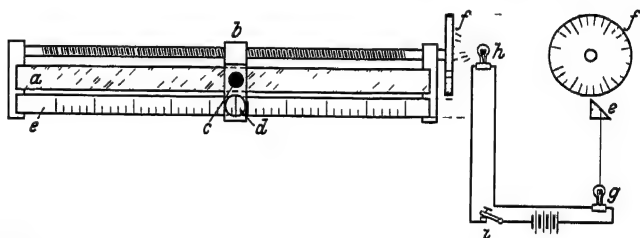


Abb 44 Verfeinerte Vorrichtung zur Skalenablesung bei den zweiten radiometrischen Versuchen von 1928 auf der Mt Wilson-Sternwarte [Ap J 69 (1929)]

(Gewicht 0,700 mg) Das geschliffene, polierte und mit Platin überzogene Spiegelchen hatte ein Gewicht von 0,180 mg und befand sich am Quarzfaden 3 cm oberhalb des Flügel-systems. Die Befestigung der Flügel und des Spiegelchens wurde mit Bienenwachs bewerkstelligt. Wie aus den genannten Zahlen hervorgeht, war es also gelungen, das Gesamtgewicht der wesentlichsten Teile des Instrumentes auf 0,938 mg herabzusetzen. Das ganze Radiometersystem ruhte schließlich in einem Quarzrohrchen, das nach erfolgter Evakuierung unter 0,23 mm Druck mit Wasserstoff gefüllt wurde. Während der Füllung war eine Schwingungsdauer von 12^s erreicht. Dieser Betrag konnte jedoch nicht erhalten werden. Nach mehrfachen Versuchen war es schließlich gelungen, eine sich gleichbleibende Schwingungsdauer von 1^s,5 zu erreichen. Prinzipiell scheint es jedoch möglich zu sein, mit dieser Apparatur größere Schwingungsdauern zu erreichen, falls es gelingen sollte, offenbare elektrostatische Störungen zu eliminieren. Bei den Messungen, die 1928 am Himmel vorgenommen wurden¹, betrug bei einer Entfernung der Skala von 6 m der an der Skala abgelesene mittlere Ausschlag 0,6 mm. Als großer Ausschlag wurden 6,5 mm festgestellt. Der ganze Erfolg der Versuche beruhte auf einer sinnreich gewählten Vorrichtung, diese kleinen Ausschläge auf der Meßskala mit nennenswerter Genauigkeit ablesen zu können. Das Licht einer 100-Watt-Lampe fällt durch mehrere Blendöffnungen und eine langbrennweitige Linse auf den kleinen Radiometerspiegel, der sich 5 m weit von der Lampe befindet. Von dort wird er mittels einer horizontalen Zylinderlinse auf eine 6 m entfernte Glasplatte *a* geworfen, die keine Einteilung besitzt (s. Abb 44).

¹ Ap J 69, S 293 (1929)

Die eigentliche Skala e befindet sich unterhalb der Glasplatte und ist mit ihr durch einen gemeinsamen Rahmen fest verbunden. Auf der Glasplatte erscheint dann ein Lichtfleck von etwa 1 cm Durchmesser. Mittels des Kopfes der Schraube f wird nun der kleine Schlitten b bewegt, der das Fadenkreuz d trägt. c ist ein runder Kork, dessen Größe so abgestimmt ist, daß er den Lichtfleck auf der Platte a abdeckt und nur einen schwachen Schimmer übrigläßt. Der Beobachter an der Skala kann nun praktisch in völliger Dunkelheit arbeiten. Er dreht so lange die Schraube, bis die Helligkeit rechts und links von der Korkblende gleich geworden ist. Nun drückt er auf den Schalter z , die Skala e ist auf einen Augenblick beleuchtet, und die Stellung des Fadenkreuzes sowie die Schraubenstellung können abgelesen werden. Die Ganghöhe der Schraube betrug 3 mm, demnach waren 0,03 mm direkt abzulesen und 0,003 mm noch zu schätzen. Diese Vorrichtung, die in Abb 44 schematisch wiedergegeben ist, hat sich sehr bewährt und ermöglichte den w F einer Einzelmessung auf 0,06 mm herabzusetzen.

Die optische Anordnung (s Abb 45) war ähnlich wie bei den früheren Versuchen (s Ziff 34 u 36). Die Strahlen kamen vom Coudé-Fokus des 100 Zollers (s in Abb 40) durch eine Blende von 3 mm Öffnung auf den konkaven 50-cm-Spiegel L (1 m Brennweite), der in 16 m Distanz in dem Räume konstanter Temperatur aufgestellt war. Der weitere Strahlenweg führte auf den

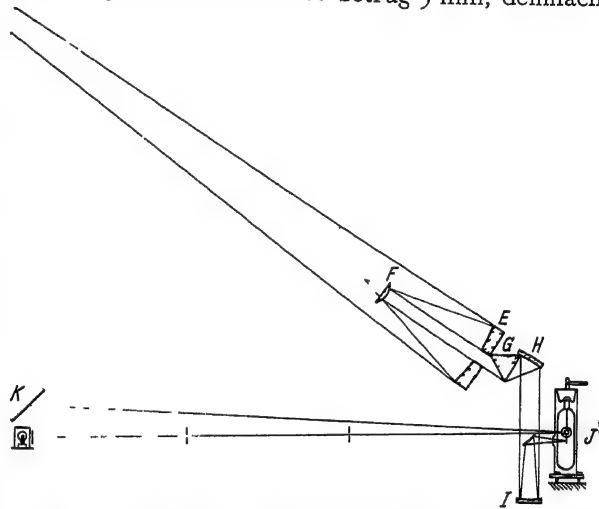


Abb 45 Radiometrische Messungen der Energieverteilung in den Sternspektren. Die instrumentelle Anordnung am 100 Zoller der Mt Wilson-Sternwarte bei den zweiten 1928 vorgenommenen Versuchen (ABBOT, ADAMS, BLBELI und NELSON) [Ap J 69 (1929)]¹

konvexen 10 cm-Spiegel F und von hier durch eine Ausbohrung in E auf das 60°-Flintglasprisma G . Nach Passieren des Prismas bewirkt der ebene Spiegel H eine Reflexion nach unten auf den konvexen Spiegel I . Nach nochmaliger Reflexion auf einem kleinen ebenen Spiegel gelangt endlich die Sternstrahlung auf den Flügel des Radiometers J . Bei den Beobachtungen von Mars und Jupiter ist nur ein kleiner zentraler Teil der Strahlung der Planetenscheibe von der genannten Blende durchgelassen worden, bei den Fixsternen dagegen war die Breite des Spektrums kaum größer als die halbe Breite der Radiometerflügel.

Die außerordentlich sinnreiche Anordnung der ganzen Apparatur hatte einen wesentlichen Nachteil. Die Strahlung wurde durch acht versilberte Spiegel, zwei Prismenflächen und vier Flächen zweier Quarzplatten beeinträchtigt. Der Energieverlust machte bei den gelben Strahlen etwa 75 %, bei den kurzwelligen Strahlen noch wesentlich mehr aus. Nennenswert einfacher ist dies bei den Untersuchungen von PRILLI und NICHOLSON gewesen, wo nahe dem Fokus des Hooker-Spiegels mit der Thermosaule gearbeitet werden konnte (s Ziff 33), in welchem Falle der Energieverlust nur die Hälfte betragen hat. Man kann sich aber kaum vorstellen, daß bei einer Wiederholung der Versuche mit dem Radiometer eine günstigere Anordnung zu treffen wäre, da ja das Radiometer in einem

eigenen Raum aufgestellt sein soll, der womöglich auf konstanter Temperatur zu erhalten ist

Zur Reduktion der prismatischen Energiekurve auf das Normalspektrum, das auch die Berücksichtigung der Absorption der Strahlung in der instrumentellen Anordnung sowie in der Erdatmosphäre in sich schließen sollte, wurde auf die 1923 (Ziff 36) ermittelten Reduktionsfaktoren zurückgegriffen, jedoch hat man bei den Versuchen von 1928 leider versäumt, neuerlich direkte Vergleichen mit der Energiekurve der Sonne vorzunehmen. Es wurden nur die prismatischen Energiekurven der 1928 untersuchten Sterne mit jenen von 1923 verglichen. Nennenswerte Abweichungen ergaben sich hier vor allem im infraroten Gebiete, sie sind nach ABBOT infolge des Austausches der Glimmeiflugel durch die Fliegenflugel im Radiometer hervorgerufen worden. So mußten neue Reduktionsfaktoren abgeleitet werden, die sodann mit den Reduktionsfaktoren von 1923 für den Übergang auf das Normalspektrum kombiniert wurden. Es ist aus den in der Veröffentlichung mitgeteilten Daten nicht ohne weiteres zu entnehmen, ob man auf diese Weise auch wirklich extraterrestrische Werte gewonnen hat. Immer-

Tabelle 10 Radiometermessungen Koordinaten der extraterrestrischen Energiekurve des Normalspektrums

(Zweite Versuche ABBOTS aus 1928. Es bedeuten A 1928 August 25, B August 26 und C 1928 September 13.)

Orientierung d. prism. Spektrums Wellenlänge λ		-6 4370	-4 4720	-2 5200	0 5890	+2 7000	+4 9050	+6 13160	+7½ 17510	+9½ 22210
β Ori	C	990	1140	584	233	89	21			
α Lyr	B	1355	446	334	644	287	91	77	29	
	C	990	642	367	377	267	105	17		
α Cyg	A		502	434	455	277	121	86		
	C		363	267	266	297	206	172		
α Aql	B	616	474	267	355	217	121	17		
α CMi	C		139	167	277	436	149	17		
α Per	B			234	189	267	231	159	13	
	C			184	244	228	177	73	38	
γ Cyg	C		390	434	244	208	149	125	60	8
α Aur	A		28	284	388	455	369	202	119	37
Mars	C			317	366	337	256	206	11	
Jupiter	B			134	178	238	241	95	6	
β Cet	A				155	297	263		35	
	B				166	198	298	116	43	
γ Aql	B				33	109	199	168	93	10
α Boo	A				200	228	376	104	183	56
α Tau	A				255	238	461	156	315	121
α Ori	A				311	485	841	1010	597	172
β And	A				189	228	312	189	104	65
	B				155	257	177	202	104	29
β Peg	A				89	218	241	176	115	80
δ Sag	A				111	99	312	120	171	32
	B				141	168	170	150	128	12
α Her	A				233	406	369	117	318	83
	B				166	257	331	387	342	163
α Cet	A				166	287	220	331	299	107
	B				67	337	319	396	191	61
	C				144	188	192	185	116	26
	C ¹				288	376	383	370	232	51

¹ Doppelte Werte der Daten der vorhergehenden Messung desselben Tages

hin sind die in Tabelle 10 wiedergegebenen endgültigen Ergebnisse, wenn sie auch nur auf Beobachtungen dreier Nächte beruhen, von großem Interesse, da sie für Mars, Jupiter und eine ganze Reihe von Fixsternen wenigstens den Charakter der Energieverteilung im Spektrum erkennen lassen und auch relative Vergleichen ermöglichen. Die Ergebnisse von 1928 und 1923 weichen voneinander durchschnittlich um 20% ab. Der wF einer Beobachtung wird zu $\pm 12\%$ veranschlagt. Nach H. KIENLE¹, der die Möglichkeiten künftiger Radiometermessungen behandelt, wäre für den Fall, daß man sich mit einer mittleren Genauigkeit von 10% begnügen wollte, als Auffangfläche mindestens ein 3,5 m-Spiegel nötig. Auch ABBOT ist sich der Unvollkommenheit der Messungen von 1928 voll bewußt. Für zukünftige Untersuchungen hält er eine 10mal größere Empfindlichkeit des Radiometers für erforderlich, empfiehlt auch den Messungsbereich sowohl weiter nach langen als auch nach kurzen Wellen hin auszudehnen, ferner eine kontinuierliche Registrierung des Spektrums vorzunehmen, um den Charakter der Kurven besser studieren zu können und, was hier am wichtigsten ist, einen schärferen Anschluß an eine Standard-Energiekurve zu gewinnen. Wenn auch seit 1928 keine neuen Versuche mehr angestellt wurden, so ist doch der von ABBOT gewiesene Weg prinzipiell gangbar, und man muß hoffen, daß man in naher Zukunft auch zu zuverlässigen absoluten Energiemessungen in den Sternspektren gelangen wird.

1) Möglichkeiten verfeinerter Apparate für künftige Strahlungsmessungen der Himmelskörper.

38. Neueste Pyrheliometertypen Die gebräuchlichsten Pyrheliometer zeigen noch immer gewisse Nachteile, von denen auch das Silver-Disk-Pyrheliometer nicht frei ist. Als Hauptnachteil kann der Umstand bezeichnet werden, daß bei jeder Sonnenstrahlungsmessung zugleich ein nennenswerter Teil der Sonnenumgebung mitgemessen wird, also stets Himmelsstrahlung additiv wirksam ist. Zwei weitere Nachteile liegen in der verhältnismäßig langsamen Wirkungsweise des Apparates und in dem zweifellos vorhandenen Auftreten einer störenden persönlichen Gleichung. Diese Schwierigkeiten sind auch den Smithsonian-Beobachtern nicht entgangen. In der jüngsten Veröffentlichung des Astrophysikalischen Observatoriums² gibt nun ABBOT die Beschreibung eines neuen Instrumentes, das die genannten Fehlerquellen zu vermeiden sucht. Beobachtungsergebnisse liegen bisher noch nicht vor.

Das Prinzipielle der Neukonstruktion liegt in einem Kompensationssystem mit kleinstmöglichen Empfängeröffnungen. Die Sonnenstrahlung kann wahlweise in das System I und II geleitet werden, je nachdem der Verschluss *H* (Abb. 46) auf den Tubus *B* oder *B'* gedreht wird. In einem Holzgehäuse liegen die Empfängerkammern *D* und *D'*, eingebettet in einen gemeinsamen Kupferblock. Nach Passieren der Quarzlinsen *C* und *C'*, die aus je zwei aneinandergekitteten Plankonvexlinsen bestehen, gelangen die Sonnenstrahlen durch kleine Öffnungen des Kupferblockes in die Kammern *D* und *D'* und zugleich in die inneren Kammern *E* und *E'*, das eigentliche Meßgerät mit dem Bolometerstreifen. Diese Hauptkammern *E* und *E'* sind nach außen hin durch dünne Quarzfenster luftdicht abgeschlossen, die Innenwände der Kammern mit Zinn ausgeschlagen und vollkommen geschwarzt. Die Widerstandstreifen *F* und *F'* sind aus Manganin hergestellt, ebenfalls geschwarzt und, wie aus der Abb. 46 hervorgeht, spiralförmig angeordnet. Die Zuführungsleitungen führen auf den Wählschalter *I*, der mit einer Stromquelle in Verbindung steht. Die

¹ Naturwiss. 18, S. 96 (1930)

² Smithsonian Ann. 5, S. 89 (1932)

Kammern D und D' sind mittels Rohren an ein Manometer angeschlossen. Es wird vorgesorgt, daß sie vor Beginn der Beobachtung unter gleichem Druck stehen.

Wird nun eines der beiden Pyrheliometersysteme der Sonnenstrahlung ausgesetzt, so erfolgt einerseits eine Absorption der Strahlung am Meßstreifen, andererseits aber auch noch eine Reflexion an den Wänden der inneren Kammer. Letztere

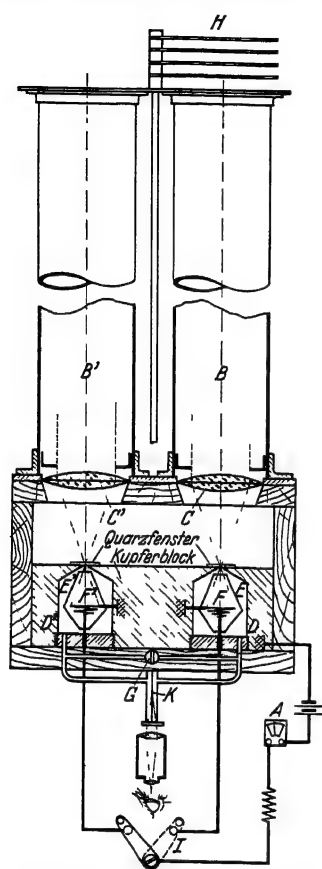


Abb 46 Schematische Skizze eines neuen Pyrheliometer-typus Zwillingsystem nach dem Kompensationsprinzip (Entwurf von C G ABBOT [Smithson Ann 5 (1932)])

bewirkt eine Erwärmung der Luft in der Kammer und damit eine am Manometer erkennbare Störung des Gleichgewichtes. Nun tritt die Kompensationseinrichtung in Wirksamkeit. Man erwärmt das zweite System so lange durch Stromzufuhr, bis das Manometer wieder in die Ruhelage zurückkehrt. Bei einer vollständigen Beobachtungsreihe wird zuerst die Sonnenstrahlung in das System I geleitet und der elektrische Strom in das System II, dann umgeschaltet auf System II bzw I und dieser Vorgang mehrfach wiederholt. Der Meßvorgang dieser Apparatur besteht demnach darin, die Wärmestrahlung der Sonne im Kompensationswege durch elektrische Erwärmung eines Zwillingsystems zu ermitteln.

Wie erwähnt, stehen Anwendungsergebnisse noch aus. Zweifellos hat die Methode einen objektiven Charakter und gestattet auch eine rasche Durchführung einer Messungsserie. Inwiefern auch die Forderung nach Ausschaltung des Himmelslichtes erfüllt ist, die durch die schmale Eintrittsoffnung der Kammern E und E' angestrebt wird, kann vor der praktischen Erprobung nicht entschieden werden. Es sei noch bemerkt, daß das Instrument als Absolutinstrument zur Eichung anderer Apparate dienen konnte, sobald es gelingt, den Energieverlust in den Quarzlinsen und Quarzfenstern verläßlich zu ermitteln.

39 Verbesserte Absolut-Pyrheliometer Das Water-Flow-Pyrheliometer (s. Ziff. 8), wie es von den Beobachtern des Smithsonian-Observatoriums verwendet wurde, hat neben seinen unleugbaren Vorzügen den Nachteil, daß bei Messungen der Sonnenstrahlung, die mit diesem Instrument vorgenommen wurden, vielfach unliebsame Schwankungen in den Galvanometerausgängen auf-

getreten waren. Diese Unregelmäßigkeiten setzen die Meßgenauigkeit unnötig herab. Die Ursache der Schwankungen liegt, wie oftmals festzustellen war, in Veränderungen der Geschwindigkeit der Wasserbewegung und in den Temperaturschwankungen des Wassers. V. M. SHULGIN¹ macht zur Behebung dieses Ubelstandes den Vorschlag, das Pyrheliometer als Kompensationsinstrument zu bauen und den Wasserstrom in ein Zwillingsystem zu leiten. Statt mit Ausschlägen wird mit einer Nullmethode gearbeitet und die Einwirkung der

¹ M. Weather Rev. August 1927

Sonnenstrahlung in einer Kammer durch elektrische Erwärmung der zweiten Kammer kompensiert. Dargestellt erreicht man, daß alle Schwankungen des Wasserstromes und der Wassertemperatur ausgeglichen werden. Es sind demnach hier ähnliche Prinzipien angewendet wie bei dem in der vorigen Ziffer beschriebenen neuen Pyrhiometer.

Die Vorschläge von SHULGIN sind einige Jahre später von ABBOT und ALDRICH im allgemeinen übernommen worden und führten zu einer verbesserten Konstruktion, dem sog. Water-Flow-Pyrheliometer Nr 5. Das in Ziff 8 beschriebene Instrument Water-Flow-Pyrheliometer Nr 3 wurde hierzu herangezogen und von A. KRAMER zu einem Zwillingssystem umgebaut. Es ruhen nunmehr beide Systeme in einem gemeinsamen metallischen Behälter. Für beide Kammern ist ein gemeinsamer Zufluß des Wasserstromes vorgesehen, durch sorgfältig gewählte Einrichtungen eine ständige und rasche Zirkulation des Wassers gewährleistet. Eine Thermosaule, bestehend aus acht in Serie geschalteten Nickel-Platin-Thermoelementen, dient zur Feststellung der Temperaturgleichheit des aus beiden Kammern ausfließenden Wassers. Die besten Resultate¹ ergeben sich bei einem Wasserstrom von $45 \text{ cm}^3/\text{min}$ in jedem System. Ohne elektrische Kompensation zeigte das Galvanometer bei Belichtung eines Systems des Pyrhiometers Nr 5 einen Ausschlag auf der Skala von 90 mm. Bemerkenswerterweise überschritt die Unruhe des Galvanometers niemals den Betrag von 0,1 mm, demnach sind die zufälligen Schwankungen von der Größenordnung $1 \cdot 10^{-3}$ des Ausschlages. Dieses Instrument stellt daher eine ganz wesentliche Verbesserung des Standard-Pyrhiometers dar.

Bei den Beobachtungen wurde die Nulllage des Galvanometerausschlages festgelegt, sobald beide Systeme gleichzeitig der Sonnenstrahlung ausgesetzt waren. Die zwischen den beiden Systemen dann noch vorhandenen Differenzen erreichen nur selten 1%. Belichtet wurde während 2 Minuten. Diese Zeit war erforderlich, um den vollen Effekt der Sonnenstrahlung in dem einen System zu erzielen. Die gleichzeitige elektrische Erwärmung des zweiten Systems macht sich am Thermoelement natürlich rascher fühlbar. Wenn nach 2 Minuten in beiden Systemen der volle Effekt erzielt war, erfolgte, in ähnlicher Weise wie in der vorigen Ziffer auseinandergesetzt, der Wechsel der beiden Systeme. Es ist klar, daß die Genauigkeit der mit diesem Instrument gemessenen Strahlungsintensität infolge der gewählten Kompensationsanordnung von der Temperatur des Wassers und von der Geschwindigkeit des Wasserstromes unabhängig ist.

Ungefähr zur selben Zeit wurde im Auftrage der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin nach Angaben von C. TINGWALD² ein neues Pyrhiometer für Absolutmessungen konstruiert, das auf ähnliche Prinzipien gegründet ist wie das eben beschriebene ABBOT'sche Instrument. Es dürfte ihm allem Anschein nach zumindest gleichwertig sein. Auch der TINGWALD'sche Apparat, den man am besten als Kompensations-Water-Stir-Pyrhiometer bezeichnen kann, ist ein Zwillingssystem, das als Nullinstrument arbeitet. Die identische Anordnung der beiden Meßkörper ist aus der schematischen Skizze der Abb 47 ersichtlich. Die Ansatzrohre, durch welche die Strahlung die beiden Meßkörper erreicht (in der Abbildung ist nur ihr unterster Teil wiedergegeben), sind außen vernickelt und innen geschwarzt. Sie haben eine Länge von 270 mm und einen Durchmesser von 45 mm und besitzen in ähnlicher Weise wie das Water-Flow-Pyrhiometer (s. Ziff 10) eine Anzahl von außen nach innen zu immer kleiner werdenden geschwarzten Diaphragmen zur Ausblendung der zu messenden Sonnenstrahlen. Die dem Meßkörper nachstgelegene Blende hat eine Öffnung von 25 mm.

¹ C. G. ABBOT u. L. B. ALDRICH, Smithsonian Misc. Coll. 87, Nr 15 (1932).

² Z. f. Instr. 51, S. 593 (1931).

Die Kalorimetergefäße, in einem Dewar-Gefäß eingebettet, sind aus Messing und haben eine Länge von 87 mm und einen Durchmesser von 44 mm. Sie sind thermisch isoliert, zudem von einem Kupfermantel umhüllt. Innerhalb der Kalorimetergefäße ruhen die eigentlichen Meßkörper, geschwarzte zylindrische Gefäße von 29 mm Durchmesser und 75 mm Länge. In gleicher Weise wie bei den Smithsonian-Instrumenten ist das nach unten konisch verlaufende, aus Kupferblech bestehende Ende der direkte Strahlungsempfänger. Der freigelassene Raum zwischen Meßkörper und Wandung der Kalorimetergefäße ist wasserumflossen.

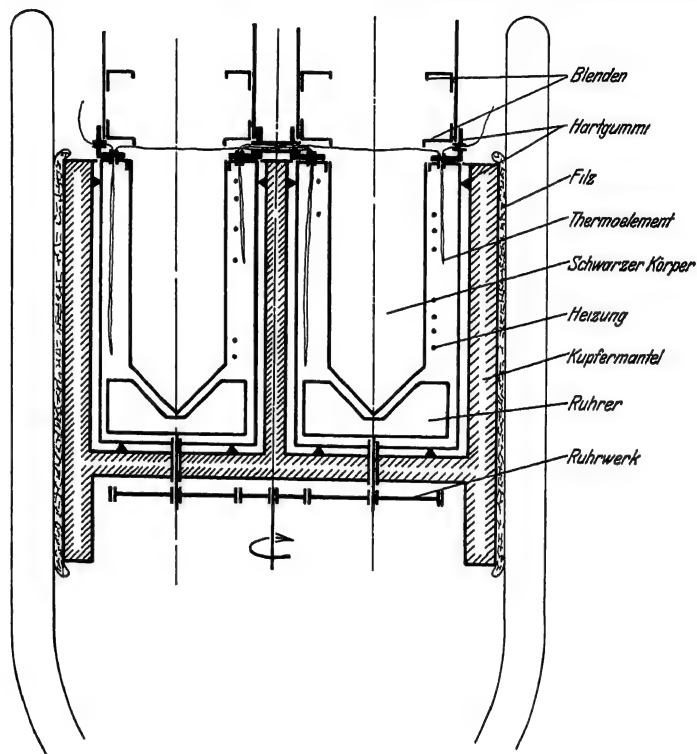


Abb 47 Das neue Absolutinstrument der Phys.-Techn. Reichsanstalt (C. TINGWALDT) zur Messung der Gesamtstrahlung der Sonne. Schematisches Bild der zentralen Teile dieses verbesserten „Water-Stir“-Pyrehometers. [Zf Instrk 51 (1931)]

und enthält die Heizspule aus Konstantan, in flachen Messingrohrchen geschützt, sowie Glasrohrchen mit den Thermosaulen der Kombination Kupfer-Konstantan. Zur Aufrechterhaltung einer gleichmäßigen Wassertemperatur wird die Flüssigkeit durch zahnradgetriebene, schaufelartige Rührer in gleichmäßige Bewegung versetzt.

Die Wirkungsweise der Apparatur ist dieselbe wie bei der Smithsonian-Konstruktion. Die Sonnenstrahlung fällt auf den Empfänger, die im Meßkörper absorbierte Wärme überträgt sich auf den wassererfüllten Zwischenraum des Kalorimeters, und die Thermosaule zeigt am Galvanometer einen Temperaturanstieg an. Nun wird im Zwillingsystem die Konstantanspule so lange elektrisch geheizt, bis die Temperaturdifferenz wieder ausgeglichen ist (Nullmethode). Die eingestrahelte Sonnenenergie kann dann der elektrisch zugeführten Energie gleichgesetzt werden. Bei geeigneter Wahl des Galvanometers ist die Sonnenstrahlung

mit diesem Instrument ohne weiteres auf 1% zu ermitteln. Die Genauigkeit ist demnach zumindest von gleicher Größenordnung, wie bei dem in dieser Ziffer genannten verbesserten Water-Flow-Pyrheliometer von ABBOI¹.

Direkte Vergleichen mit den Smithsonian-Instrumenten sind bisher noch nicht veröffentlicht, dagegen Simultanmessungen mit dem KÄNGSIRÖMSCHEN Standard-Pyrheliometer² (s. Ziff 9). Im Mittel ergab sich das Verhältnis ÄNGSTROM/TINGWALD zu 1,018. Da man andererseits die mit dem ÄNGSIRÖMSCHEN Instrument gewonnenen Werte noch mit dem Faktor 1,035 zu multiplizieren hat, um das System der „Smithsonian Revised 1913 Absolute Scale“ zu erhalten, so ergibt sich, daß die Smithsonian-Skala gegenüber der TINGWALDISCHEN um 1,8% zu hoch oder die TINGWALDISCHE um 1,8% zu niedrig ist. Zweifellos liegt der Fehler jedoch bei der Smithsonian-Skala. Es wurde nämlich auch mit dem beschriebenen verbesserten Water-Flow-Pyrheliometer Nr 5 nach sorgfältigen Vergleichsmessungen von ABBOI² eine unabhängige neue Standardskala der Sonnenstrahlung aufgebaut, die sogar 2,5% unter der Smithsonian-Skala von 1913 gelegen ist. Die Korrektur ist also im selben Sinne wie bei TINGWALD.

Berücksichtigt man die aus dem Water-Flow-Pyrheliometer Nr 5 folgende Korrektur der Smithsonian-Skala bei dem Mittelwert der Solarkonstante $1,940 \text{ gcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ (s. Ziff 20), so wäre nunmehr der richtige Wert

$$1,892 \text{ gcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} = 1,320 \cdot 10^6 \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

Gewiß sind weitere Prüfungen der Absolutskala noch notwendig, immerhin erkennt man aber, daß die jüngsten Verbesserungen an der Apparatur der Standardinstrumente bisher als gesichert angesehen und grundlegende Werte der Sonnenstrahlung als zweifelhaft erscheinen lassen.

40 Moderne Formen von Thermoelementen Unter den verschiedenen Typen moderner Thermoelemente haben in der letzten Zeit besonders die von J. H. MOLL³ entwickelten Verbreitung gefunden. Sie zeichnen sich durch nennenswerte Empfindlichkeit und rasche Einstellung aus und vor allem durch den Umstand, daß der Empfänger sehr kleine, die „kalte“ Lotstelle jedoch maximale Wärmekapazität besitzt. Ein solches Thermoelement ist in Abb 48 schematisch wiedergegeben. Es besteht aus zwei kupfernen Trägern *e* und *f*, auf denen bei *a* und *c* schmale Metallbandchen aufgelotet sind, das eine aus Konstantan, das andere aus Manganin. Ihre Dicke konnte durch ein besonderes Walzverfahren bis auf etwa $7 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ herabgesetzt werden. Von derselben Dicke ist auch die gemeinsame Lotstelle *b*. Es kann sowohl die Lotstelle *b* als auch die ganze Länge des Bandchens der Strahlung ausgesetzt werden. Infolge der geringen Kapazität des Empfängers und der guten Wärmeleitung zwischen den Verbindungen der ganzen Apparatur ist das Wärmegleichgewicht sehr schnell erzielt. Diese Thermoelemente können zu Säulen vereinigt werden, die bei der großen Type für Strahlungsmessungen aus 80 Paaren bestehen. Günstige Ergebnisse werden auch mit der MOLLschen Mikro-Thermosäule, die in Abb 49 wiedergegeben ist, erzielt. Sie besitzt einen Widerstand von 30 Ohm und zählt 18 Elemente, die in einem Kreis von nur 6 mm Durchmesser angeordnet sind. Um die Apparatur gegen Luftströmungen abzuschirmen, ist sie mit einem Flußspatfenster versehen. Diese Type ist neuer-

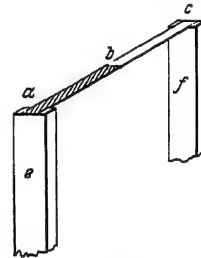


Abb 48
Konstruktions-
bild des MOLL-
schen Thermoelementes und
Kupferträger
a und *c* „kalte“
Lotstellen, *b* „war-
me“ Lotstellen (im
übrigen siehe Text)

¹ Ann d Phys 67, S 633 (1899)

² Smithsonian Misc Coll 87, Nr 15 (1932)

³ Proc Phys Soc London 35, S 5 (1923)

dings nach Angaben von MOLL und BURGER¹ auch als Vakuum-Thermoelement (s Ziff 30 u 32) hergestellt worden (Abb 50) Das Konstantan- und Manganinbandchen *A* bzw *C* besitzt hier nur mehr eine Dicke von $1 \cdot 10^{-3}$ mm, dasselbe gilt auch für die Lotstelle *B* Das Empfängerbandchen ist auf einer Seite geschwärzt und wird von zwei Metalldrähten getragen, die in einem stark evakuierten Glasröhrchen eingeschmolzen sind Das Röhrchen ist außerdem in einer Metallrohre zwecks Wärmeschutz eingeschlossen Die Strahlung fällt durch ein kleines Fensterchen aus UV-Glas oder Flußspat in der Metallrohre auf den Empfänger, ein zweites Fenster gestattet die bequeme Justierung des Apparates MOLLsche Thermoelemente sind, abgesehen von ihrem häufigen Einbau in thermoelektrische Photometer, in der Astrophysik noch verhältnismäßig wenig verwendet worden Hervorgehoben seien aber die guten Erfahrungen, die mit ihnen bei Sonnenstrahlungsmessungen von C WIRTZ² in Gallivare und G ARMELLINI und G ANDRISSI³ auf der Kapitol-Sternwarte gewonnen wurden

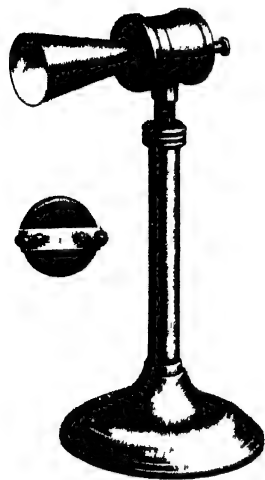


Abb 49 Mikro-Thermosaule nach MOLL (Kipp und Zonen, Delft)

Das Pyrowerk Dr R HASE⁴, Hannover⁵ 97, hat sehr leistungsfähige Thermoelemente erzeugt, die für technische Verwendungszwecke noch in sog Strahlungsrohre eingebaut werden Die Elemente zeichnen sich sowohl durch geringe thermische Tragheit als auch durch bemerkenswerte Empfindlichkeit aus, was durch geringe Empfängerdimensionen und geeignete Metallkombinationen erreicht wird Die vier wesentlichen Elementtypen, in Abb 51 wiedergegeben, sind durchweg in Glasballons von 0,25 mm Wandstärke eingeschlossen, die entweder evakuiert oder gasgefüllt geliefert werden Die Durchlässigkeit dieser Glasballons beträgt 89% für Strahlung der Wellenlänge 1μ , 75% für 4μ und 10% für $6-9 \mu$ Das geschwärzte Metallscheibchen des Empfängers hat einen Durchmesser von 3 mm und eine Dicke von nur $1 \cdot 10^{-3}$ mm Es bildet gemeinsam mit einem wenige Millimeter langen, horizontal angeordneten Metallstabchen die „warme“ Lotstelle Die andere Lotstelle liegt bereits im Strahlungsschatten, jedoch in unmittelbarer

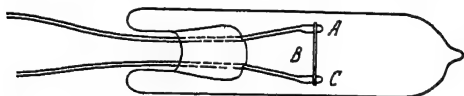


Abb 50 Schematisches Bild des Vakuum-Thermoelementes nach MOLL (Kipp und Zonen, Delft)

Nahe der ersten Bei der Type N befindet sich die „kalte“ Lotstelle an der Verbindung des Stabchens mit der Durchfuhrungselektrode, bei Type NS hinter einem durchbohrten 8 mm-Hohlspiegel, der hier zur Vergrößerung der wirksamen Auffangfläche angebracht ist Bei der Type R liegt sie außerhalb des Glasballons Hier besteht das Thermoelement aus dem Empfängerscheibchen, einem Halterahmen und drei weiteren dünnen Drahten, die die Lage des Scheibchens fixieren Die Type KS schließlich ahnelt dem auf dem Mt Wilson verwendeten Empfänger (s Ziff 32) Sie ist wie Type R angeordnet, besitzt aber zwei gegeneinandergeschaltete Empfänger-

¹ Phil Mag (6) 1, S 618 (1925), Z f Phys 32, S 575 (1925)

² Publ Kiel 17 S 9 (1930)

⁴ Z f Phys 15, S. 52 (1932)

³ Rom Campidoglio Contr 40 u 41 (1933)

⁵ Siehe H KREFFT und M PIRANI, Z f techn Phys 14, S 393 (1933)

scheibchen, wodurch sekundäre Thermoeffekte kompensiert werden. Die Type R hat die relativ größte Trägheit (12 Sekunden), gegenüber 4 bis 5 Sekunden bei den anderen Typen. Die Widerstandswerte betragen für die vier verschiedenen Typen der Reihe nach 10, 15, 6 und 30Ω .

Wie schon 1914 W. W. COBLENTZ¹ feststellen konnte (Ziff 30), ist die hohe Strahlungsempfindlichkeit eines Thermoelementes weniger von der hohen Thermokraft des verwendeten Materials, als von der geringen Wärmekapazität des Empfängers abhängig. Diese Erkenntnis hat dahin geführt, daß man in erster Linie bestrebt war, das Gewicht und die Dicke des Empfängers immer mehr herabzusetzen. Zufolge der ersten Veröffentlichung von E. PETTIT und S. B. NICHOLSON aus 1922 (s. Ziff 32) soll bei den von ihnen verwendeten Elementen die Empfängerdicke von der Größenordnung $1 \cdot 10^{-3}$ mm gewesen sein. 6 Jahre später² berichteten dieselben Autoren, daß ihre neuen Thermoelemente

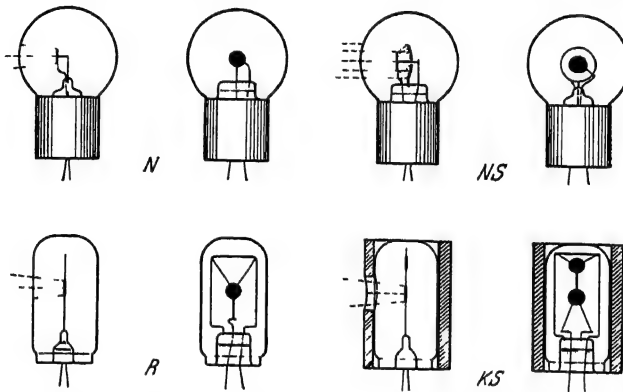


Abb. 51 Einige Typen der von R. Hasl entwickelten Thermoelemente (Pyrowerte Hannover 97)

eine Empfängerdicke von $3 \cdot 10^{-2}$ mm besessen haben. Weshalb mit den Dimensionen wieder hinaufgegangen worden ist, womit auch eine Gewichtsvermehrung eines Empfängers von $3 \cdot 10^{-2}$ mg auf $1 \cdot 10^{-1}$ mg verbunden war, ist nicht verständlich. Jedenfalls ist es bei den in vorliegender Ziffer genannten modernen europäischen Typen gelungen, die Empfängerdicke auf $1 \cdot 10^{-3}$ mm herabzusetzen.

Durch die Arbeiten von C. MÜLLER³ scheint es in jüngster Zeit sogar möglich geworden zu sein, in der Verfeinerung der Konstruktion noch wesentlich weiterzukommen und damit auch eine bemerkenswerte Empfindlichkeitssteigerung zu erzielen. Diese wird dadurch erreicht, daß durch ein neues Verfahren auf Ionen und Auswalzen des Empfängermaterials verzichtet werden kann. Die Herstellung dieser Elemente - gewählt ist die Kombination von Konstantan mit Chromnickel - geht folgendermaßen vor sich: Ein elektrolytisch erzeugter Nickelstreifen kleinstmöglichen Durchmessers wird auf galvanischem Wege zu einer Hälfte mit Kupfer, zu anderen mit Chrom überzogen (s. Teil a von Abb. 52). Durch Ausglühen des ganzen Streifens bilden sich die Diffusionslegierungen Nickelkupfer (Konstantan) bzw. Chromnickel (Abb. 52b). Es zeigte sich, daß diese Diffusionslegierungen um so leichter durchführbar waren, je dünner die Schichten gewählt wurden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß nach Angabe des Autors solche abschnittswise Legierungen am fertig montierten

¹ Bull. Bur. of Stand. 11, S. 131 (1914)

² Ap. J. 68, S. 270 (1928)

³ Naturwiss. 19, S. 416 (1931)

Feingebilde durchgeführt werden können. Auf diese Weise ist es gelungen, Thermolemente zu erzeugen, deren Streifendicke nur mehr $1 \cdot 10^{-4}$ mm betrug. Auch das Gewicht des Empfängers erscheint ganz wesentlich herabgesetzt. Es beträgt bei der empfindlichsten MULLERSchen Type O₆ $4 \cdot 10^{-4}$ mg. Nach Prüfungen von H. THEISSING erzielt man mit diesem Element und einer Hefnerlampe in 1 m Distanz, gemessen an einem ZERNIKE-Galvanometer Cz (5,3 Einstellzeit, 1 m Skalenabstand), pro mm² einen Ausschlag von 168 mm, das ist etwa

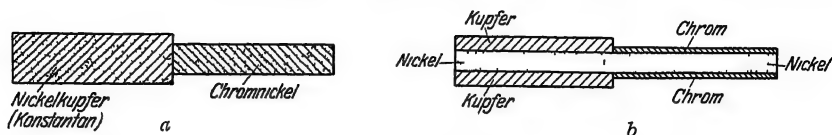


Abb 52 Neue Mikrothermolemente nach C MÜLLER. Links (a) Schematisches Bild des Thermolementes vor dem Ausglühen. Rechts (b) Schematisches Bild des Elementes mit den Diffusionslegierungen nach dem Ausglühen [Naturwiss. 19 (1931)]

um eine Zehnerpotenz mehr als beim hochempfindlichen MOLLschen Thermolement, natürlich unter identischen Versuchsbedingungen. Die Ausschläge waren zweifellos noch größer gewesen, wenn, wie es bei den astrophysikalischen Anwendungen ja immer der Fall ist, die Strahlung nur auf die „warme“ Lotstelle selbst vereinigt worden wäre. Soweit bekannt, sind die MÜLLERSchen Thermolemente in der Astrophysik, abgesehen von dem Einbau in ein Babelsberger Laboratoriums-Meßgerät, noch nicht verwendet worden, diesbezügliche Versuche dürften aber sehr aussichtsvoll sein.

41 Das Kampometer Ein außerordentlich empfindlicher Empfänger zur Messung der Wärmestrahlung ist kürzlich von C G ABBOT¹ entwickelt worden, der entsprechend seiner Konstruktion und Wirkungsweise etwa zwischen dem Mikroradiometer (Ziff 27) und dem Bimetall-Aktinometer (Ziff 7) eingereiht werden konnte. Es wird „Kampometer“ (nach dem griechischen „Biegung“) genannt und verspricht die besten Thermolemente und Radiometer an Empfindlichkeit zu erreichen, wenn nicht zu übertreffen. Astrophysikalische Anwendungen liegen bisher noch nicht vor.

Die Konstruktion der Meßanordnung sei im Zusammenhang mit Abb 53 dargelegt. An einer Aufhängevorrichtung (in der Abbildung nicht gezeichnet) hängen aneinander zwei spiralförmig aufgerollte bimetalische Streifen *f* und *g* von entgegengesetztem Windungssinn. Sie bestehen aus Messing und Invar, in einer verbesserten Konstruktion aus Molybdän und Kadmium, und besitzen eine Breite von 0,8 mm und eine Dicke von $8 \cdot 10^{-3}$ mm, der Durchmesser der geschwanzten, aufgewundenen Spiralen beträgt etwa 0,7 mm. Das Verbindungsstück *h* sowie die an die Spiralen oben und unten anschließenden Teile *d* und *e* sind feine Quarzdrähte. Bei der mit *a* bezeichneten Stelle ist nun eine Gruppe von kleinen Magneten untereinander angeordnet. Bei *b* befindet sich eine gleichdimensionierte zweite Gruppe von Magneten mit entgegengesetzter Polarität, die zudem gegen die Vertikalebene der ersten Gruppe um einen kleinen Betrag parallel verschoben ist. Von oben betrachtet erscheinen daher die beiden Gruppen von Magneten derart, wie es in der Skizze *c* der Abb 53 (Mitte unten) schematisch dargestellt ist. Der ganze Meßkörper ist von einem (nicht gezeichneten) Glaszylinder umgeben, der bis auf $3 \cdot 10^{-3}$ mm Druck evakuiert und seitlich gegenüber dem eigentlichen Empfänger *f* mit einem Fenster versehen ist, das eine besonders hohe Durchlässigkeit für langwellige Strahlung besitzt.

¹ Smithsonian Misc Coll 89, Nr 3 (1933)

Kapitel 6

Reduktion photographischer Himmelsaufnahmen.

Von

ARTHUR KÖNIG-Jena

Mit 7 Abbildungen

a) Einleitung

1 Vorbemerkungen Die bisher erschienenen Darstellungen der zur Ableitung von Sternorten aus photographischen Himmelsaufnahmen entwickelten Verfahren¹⁻⁵ sind gegenwärtig insofern veraltet, als sie ausschließlich auf die höchstens $2^\circ \times 2^\circ$ umfassenden Plattenfelder der zweilinsigen Objektive (vgl. Ziff 3) zugeschnitten sein konnten. Aufgabe der vorliegenden Bearbeitung war es daher, auf die modernen Objektive, welche Plattenfelder von 10° Durchmesser und mehr liefern, Rücksicht zu nehmen.

Die Formelentwicklungen dieses Kapitels beschränken sich nicht auf die Ableitung der Grundgleichungen, sondern sind bis zu den numerisch anzuwendenden Gleichungsformen durchgeführt, so daß der gesamte für die Reduktion praktisch benutzte Formelapparat zur Verfügung steht. Demgegenüber konnten die Fragen, welche sich an die Instrumente, die Technik der Aufnahme und ihre Ausmessung knüpfen, nur kurz behandelt werden. Vollig ausscheiden mußten Parallaxen- und Eigenbewegungsbestimmungen, Doppelsternmessungen sowie die Verfahren zur genäherten Ermittlung einzelner Orte (z. B. kleiner Planeten) durch Interpolation zwischen bekannten Nachbarsternen.

In manchen Fällen erfordert die Natur des Gegenstandes auch die Einleitung rechen technischer Fragen. Bei allen in diesem Zusammenhang gegebenen Formeln und Hilfstafeln ist angenommen, daß die Rechnung mit Maschine, Rechenschieber oder Multiplikationstafeln, nicht logarithmisch, geführt wird. Eine Ausnahme bildet nur Anhang II, wo Tafeln für beide Rechenarten mitgeteilt sind.

2 Zusammenstellung der wichtigsten Bezeichnungen

x, y = gemessene Koordinaten (In Ziff 8 u. 9 dienen x, y, z als Bezeichnung räumlicher rechtwinkliger Koordinaten)

$\Delta x, \Delta y$ = Verbesserungen von x, y wegen verschiedener Einflüsse (Skalenwert, Refraktion u. dgl.)

¹ SCHEINER, Die Photographie der Gestirne. Leipzig 1897.

² BERGSTRAND, Undersökningar öfver stellarfotografierens användning vid bestämningar af fjerstjärnornas arliga parallaxer. Upsala 1899.

³ RAYET, Ann. Obs. Bordeaux 9 (1900).

⁴ TRÉPIED, Cat. phot. du ciel. Obs. Alger, Introduction. Paris 1903.

⁵ ZURHELLEN, Darlegung und Kritik der zur Reduktion photographischer Himmelsaufnahmen aufgestellten Formeln und Methoden. Inaug.-Diss. Bonn 1904.

- ξ, η = verbesserte gemessene Koordinaten (In Ziff 8 dienen ξ, η, ζ als Bezeichnung räumlicher rechtwinkliger Koordinaten)
 X, Y = Tangentialkoordinaten (Ziff 7)
 A, B, C = Plattenkonstanten (Ziff 12, 20)
 p, q = Koeffizienten der Plattenneigung (Ziff 13)
 β = Koeffizient der photographischen Refraktion, bezogen auf wahre Zenitdistanz (Ziff 14)
 β' = Koeffizient von $\text{tg}^3 \zeta$ in der Entwicklung der photographischen Refraktion nach Potenzen von $\text{tg} \zeta$ (Ziff 14)
 ζ = wahre Zenitdistanz des Tangentialpunkts (Ziff 14)
 χ = parallaktischer Winkel am wahren Tangentialpunkt (Ziff 14)
 t = Stundenwinkel des wahren Tangentialpunkts (Ziff 16)
 k_1, k_2, k_3, k_4 = Hilfsgrößen zur Berechnung der Refraktion (Ziff 16)
 N, n = BRUSSELSche Hilfsgrößen zur Berechnung von ζ, χ, k_1, k_4 (Ziff 16)
 $\mathfrak{B} = \beta \sin 1''$ (Ziff 16 und Anhang II).
 $b = \beta \sin^2 1''$ (Ziff 16 und Anhang II)
 $\mathfrak{B}' = \beta' \sin 1''$ (Anhang II)
 \mathfrak{f} = Aberrationskonstante (Ziff 17)
 Q, R, S = Hilfsgrößen zur Berechnung der Aberration (Ziff 17)
 α, δ = A R und Dekl eines Sterns
 $\mathfrak{A}, \mathfrak{D}$ = A R und Dekl des Tangentialpunkts (Ziff 8)
 P = Positionswinkel (Ziff 8)
 q, v = Hilfsgrößen zur Transformation von X, Y in α, δ und umgekehrt (Ziff 10)

b) Aufnahme und Ausmessung.

3. Objektive Der Aufbau und die optischen Leistungen der astrophotographischen Objektive sind an anderer Stelle dieses Bandes¹ bereits ausführlich behandelt worden, so daß hier wenige Bemerkungen genügen. Es werden an ein Objektiv, das zur photographischen Bestimmung von Sternorten dienen soll, andersartige, in mancher Hinsicht strengere Anforderungen in bezug auf Korrektur der Abbildungsfehler gestellt als bei anderen Verwendungszwecken. In erster Linie ist eine gute und vor allem gleichförmige Bilddefinition innerhalb eines bestimmten Bereiches zu verlangen. Starke Unterschiede im Aussehen der Sternscheibchen zwischen Mitte und Rand der Platte bedingen stets systematische Fehler in den Sternorten. Von allen Abbildungsfehlern sind daher Koma und Astigmatismus am schädlichsten. Weniger unangenehm, als man auf den ersten Blick vielleicht vermuten mochte, ist die Verzeichnung, da man sie empirisch bestimmen und berücksichtigen kann.

Gegenwärtig kommen für photographische Ortsbestimmungen die nachstehend aufgeführten und in bezug auf ihre optischen Leistungen kurz charakterisierten Objektivtypen in Betracht.

1 Zweilinsige Objektive von langer Brennweite und kleinem Öffnungsverhältnis (höchstens 1 : 10). Behoben sind chromatische und sphärische Aberration und Koma. Die Verzeichnung ist sehr klein ($< 0'',08$ in 2° Abstand von der Achse). Nicht korrigiert sind Bildwölbung und Astigmatismus. Das brauchbare Bildfeld beträgt daher höchstens $2^\circ \times 2^\circ$.

2 Dreilinsige Objektive vom COOK-Typus. Sie besitzen größeres anastigmatisch geebnetes Bildfeld (ca. $6^\circ \times 6^\circ$) und größeres Öffnungsverhältnis (bis 1 : 4). Die Verzeichnung läßt sich nicht korrigieren und beträgt ca. $5''$ in 3° Abstand

¹ Vgl. Kap 2, ALBERT KÖNIG, Das Fernrohr, Ziff 40

von der Achse Das praktisch verzeichnungsfreie Feld ist beträchtlich kleiner als der Bereich guter Bilddefinition

3 Vierlinsige Objektive vom Ross-Typus Das Bildfeld hat annähernd gleiche Ausdehnung wie bei 2, das Öffnungsverhältnis ist kleiner (ca 1/8) Die Verzeichnung läßt sich gut korrigieren, sie ist von derselben Größenordnung wie bei 1, d h ca 0'',3 in 3° Achsenabstand

4 Vierlinsige Objektive von ZEISS (ZEISS-Astro-Vierlinser) Bildfeld (ca 6° × 6°) und Verzeichnung (ca 0'',3 in 3° Achsenabstand) sind wie bei 3 Das Öffnungsverhältnis läßt sich bis 1/3 (in größeren Brennweiten bis 1/5) steigern Ein besonderer Vorteil der Objektive ist, daß sie sich aus sehr gut durchlassigen Glasarten herstellen lassen

Die Objektive vom Ross-Typus haben für die Neueobachtung der A G - Kataloge Verwendung gefunden und sich nach den Voruntersuchungen gut bewährt Mit den ZEISSischen Vierlinsern sind photographische Ortsbestimmungen bisher nicht durchgeführt worden, doch mußte sich dieser Typus nach seinen optischen Eigenschaften gut dazu eignen

Alle vorstehend aufgeführten Objektive lassen sich sowohl für den auf gewöhnliche (nicht sensibilisierte) Platten wirksamen Wellenlangenbereich, wie auch für andere, z B den vom Auge wahrgenommenen, korrigieren Da wir heutzutage über Platten verfügen, welche bis ins Ultrarote empfindlich sind, so kann man theoretisch unter Anwendung bestimmter Plattensorten in Verbindung mit dazu passenden Filtern in Wellenlangenbezirken arbeiten, die sich bis zu einem gewissen Grade willkürlich festlegen lassen Für Ortsbestimmungszwecke ist jedoch in dieser Beziehung Vorsicht geboten, weil viele Sorten von Filtergläsern nicht den hohen Ansprüchen an optischer Homogenität entsprechen, welche hier zu stellen sind Es ist ferner zu beachten, daß die Refraktion von der Wellenlänge abhängt

Bei hinreichend engen Plattenfeldern sind natürlich auch andere abbildende Systeme (z B Spiegel) zu Ortsbestimmungszwecken verwendbar

4 Fokusbestimmung Von den mannigfachen Vorbeicungen zur eigentlichen Aufnahme, die sich auf die Justierung des Instruments u dgl beziehen, soll hier als für den vorliegenden Zweck besonders wichtig nur die Bestimmung der günstigsten Fokalstellung erwähnt werden Eine genäherte Bestimmung erhält man durch Einstellung eines hellen Sterns auf einer Mattscheibe mit der Lupe Bei „photographisch“ korrigierten Objektiven empfiehlt es sich, durch ein Blaufilter das storende langwellige Licht abzuhalten Zur genauen Fokusbestimmung macht man auf einer Platte eine Serie von Aufnahmen desselben Objekts mit gleicher Belichtungszeit dicht nebeneinander, von Aufnahme zu Aufnahme die Fokalstellung in gleichen Schritten andernd Auf der entwickelten Platte ist dann die günstigste Stellung, evtl mit leichter Interpolation, aufzusuchen Um hierbei mit Sicherheit die einzelnen Bilder den verschiedenen Fokalstellungen zuordnen zu können, wählt man die Distanzen auf der Platte von Bild zu Bild gleich, mit Ausnahme der ersten (oder letzten) Distanz, die etwa doppelt so groß zu nehmen ist Alles Weitere ergibt sich dann durch Abzählen Zu Fokusbestimmungen sind nur einwandfrei klare Nächte geeignet Wechselnde Durchsichtigkeit der Luft wirkt ebenso wie verschiedene Belichtungszeit der einzelnen Aufnahmen und wurde falsche Resultate zur Folge haben Die günstigste Fokalstellung ist nicht konstant, sondern hängt von folgenden Einflüssen ab

- 1 von der Temperatur,
- 2 vom Abstand des Sterns von der Achse,
- 3 von der Helligkeit der Bilder

Der Temperatureinfluß ist ein doppelter Es ändern sich mit der Temperatur sowohl die Länge des Kamerarohres als auch die Objektivbrennweite Die beiden

Wirkungen kompensieren sich zum Teil, man kann sogar durch geeignete Wahl der Glassorten, der Radien und des Materials für das Kamerarohr die Temperaturabhängigkeit in gewissen Fällen aufheben, wenigstens sehr klein halten. Ob und in welchem Grade eine solche Kompensation sich auch für größere astrophotographische Instrumente durchführen läßt, ist bisher, soweit dem Verfasser bekannt ist, noch nicht untersucht worden. Jedenfalls muß mit einer Abhängigkeit des Fokus von der Temperatur gerechnet und aus einer Reihe von Bestimmungen eine Einstelltafel abgeleitet werden, die zu jeder Temperatur den besten Fokus gibt.

Der Einfluß 2 ist, weil durch die Bildwölbung bedingt, bei den zweilinsigen Objektiven am stärksten. Daß die günstigste Fokalstellung für helle und schwache Sterne differiert, ist eine Folge der nie ganz korrigierbaren Reste der sphärischen Aberration. Beide Einflüsse lassen sich naturgemäß auf keine Weise beseitigen, man muß also, zwischen den verschiedenen Forderungen vermittelnd, ein Optimum zu erreichen suchen.

Obwohl an sich Doppelsterne passender Distanz die geeignetsten Objekte zur Beurteilung der besten Fokalstellung sind, wird im Hinblick auf die letztgenannten beiden Einflüsse eine möglichst sternreiche Himmelsgegend vorzuziehen sein. Man erhält aus einer solchen Aufnahme zugleich eine zahlenmäßige Bestimmung der Bildwölbung und der Neigung der Platte gegen die optische Achse.

5 Aufnahme, Behandlung der Platte Bei Platten, aus denen scharfe Sternörter abgeleitet werden sollen, ist genaues Pointieren während der Belichtung von ganz besonderer Wichtigkeit. Jeder Fühungsfehler birgt die Gefahr einer Helligkeitsgleichung in sich. Abgesehen von Ungleichförmigkeiten im Gang des Stundenantriebes und Luftunruhe sind besonders zwei Störungsquellen beim Pointieren zu nennen: Differentielle Biegung zwischen Kamera und Leitrohr und Aufstellungsfehler des Instruments. Wenn die Biegung dem bekannten Sinusgesetz gehorcht, äußert sie sich hauptsächlich in ΔR , eine einfache Methode zur empirischen Bestimmung und Berücksichtigung hat KUSNER¹ angegeben. Die differentielle Biegung braucht aber durchaus nicht immer das Sinusgesetz zu befolgen, mit Abweichungen muß vornehmlich dann gerechnet werden, wenn sich Kamera und Leitrohr in Bauart, Gewicht und Brennweite stark unterscheiden. Unter solchen Umständen ist die Bestimmung der Biegung natürlich schwieriger, kann aber prinzipiell nach derselben Methode erfolgen.

Die Aufstellungsfehler des Instruments äußern sich in einer scheinbaren Drehung des ganzen Bildfeldes um den festgehaltenen Leitstern, sind also um so störender, je größer die Belichtungszeit ist. Die größte Mehrzahl der Aufnahmen zu Ortsbestimmungszwecken dürfte wohl in der Nähe des Meridians und in mäßigen Deklinationen gemacht werden. In diesem Fall hat ein falsches Azimut den stärksten Einfluß, während ein Fehler in Polhöhe weniger stört. Bei Aufnahmen in der Nähe des Pols ist selbstverständlich eine sehr genaue Berichtigung der Aufstellungsfehler erforderlich.²

Vorstehende Bemerkungen beziehen sich auf den Fall, daß ein Leitrohr benutzt wird. Wenn man aber an einem seitlichen Okular der Kamera selbst pointiert, so scheidet die differentielle Biegung naturgemäß aus. Auch der Einfluß der Aufstellungsfehler kann unschädlich gemacht werden, indem in zwei zu beiden Seiten der Kassette angebrachten Okularen je ein Leitstern gehalten wird, wozu der Kassettenträger mit Positions-drehung versehen sein muß. Stehen diese Einrichtungen aber nicht zur Verfügung, so wirken die Aufstellungsfehler um so stärker, da das Zentrum der scheinbaren Drehung in P.W. seitlich liegt.

¹ Bonner Veroff Nr. 14 (1920), Einleitung, S. 1

² Bonner Veroff Nr. 14 (1920), Einleitung, S. 9

Zum Halten des Sterns kann entweder das ganze Instrument oder die Kassette allein mittels einer Doppelschlitteneinrichtung verstellt werden. Bei Aufnahmen in der Nahe des Pols ist ein eigentliches Pointieren nur durch Kassettenverschiebung möglich, da die Feinbewegung in Stundenwinkel dort nicht mehr wirkt.

Eine Besprechung der zahlreichen für die Entwicklung, Fixage usw. angegebenen Vorschriften muß der Spezialliteratur vorbehalten bleiben. Hier zu erwähnen ist, weil für den vorliegenden Sonderzweck wichtig, die Schichtverziehung. Es kann noch nicht als einwandfrei geklärt gelten, ob und in welchem Maße man einer Schichtverzerrung durch geeignete Behandlung der Platte vorzubeugen vermag. Daß selbstverständlich Alles, was möglicherweise schädlich wirken konnte (z. B. scharfe Temperaturwechsel, stark gerbende Bäder) zu vermeiden ist und daß trotzdem die Plattenränder besonders gefährdet bleiben, dürfte allgemein bekannt sein. Für die Ableitung genauer Sternörter ist ferner mit Rücksicht auf Helligkeitsgleichung eine recht flache Gradation erwünscht. In diesem Sinne läßt sich zwar jede Platte beeinflussen, doch widerspricht eine derartige Behandlung bis zu einem gewissen Grade dem ebenfalls oft auftretenden Wunsch, auch die schwachsten, noch entwickelbaren Sternspuren herauszuholen. Was endlich die willkürliche Beeinflussung der Korngröße anlangt, welche für die Genauigkeit der Ausmessung von Bedeutung ist, so herrscht hier ebenso wenig wie bei der Schichtverzerrung Klarheit. Mindestens ist noch nicht als sicher erwiesen zu betrachten, ob wirklich die sog. „Feinkornentwickler“ bei gleicher Belichtungszeit und gleichem durchschnittlichen Schwarzungsgrad ein wesentlich feineres Korn liefern.

6 Ausmessung Durch die Ausmessung werden die Koordinaten der Sterne auf der Platte in einem System bekannt, welches durch die Meßapparatur und ihre Anordnung definiert ist. Es kann in rechtwinkligen Koordinaten oder auch in anderen, z. B. Polarkoordinaten, gemessen werden. Wenn man von Spezialzwecken absieht, so ist gegenwärtig die Messung rechtwinkliger Koordinaten wohl das ausschließlich angewandte Verfahren, weil es eine bequeme Reduktion mit hoher Genauigkeit, insbesondere weitgehender Freiheit von systematischen Fehlern verbindet. In der folgenden Zusammenstellung der verschiedenen Meßprinzipien stehen daher die auf rechtwinklige Koordinaten sich beziehenden an erster Stelle.

A Messung mit Gitter Bei dieser bereits aus der Frühzeit der Astrophotographie datierenden Meßmethode wird auf die Platte ein sog. Gitter aufkopiert, welches nach der bekannten Herstellerfirma oft als GAUTIER-Gitter bezeichnet wird. Die Platte erscheint nach der Entwicklung mit einem Quadratnetz bedeckt, durch welches das System der gemessenen Koordinaten definiert ist. Dem Meßapparat fällt lediglich die Aufgabe zu, die einzelnen Sterne an die benachbarten Gitterlinien anzuschließen. Da die Seitenlänge der Quadrate gering ist (meist 5 mm), so handelt es sich nur um Messung kurzer Strecken. Die hierdurch bedingte einfache Konstruktion des Meßapparates ermöglicht es, ihn so einzurichten, daß die beiden Koordinaten eines Sterns gleichzeitig gemessen werden können. Diesem besonders für Massenarbeiten hoch anzuschlagenden Vorteil steht der Nachteil gegenüber, daß sich alle Gitterfehler naturgemäß in vollem Umfange auf die gemessenen Koordinaten übertragen müssen. Eine auf sämtliche Gitterpunkte sich erstreckende Fehlerbestimmung erfordert aber einen enormen Arbeitsaufwand, der sich nur in den seltensten Fällen lohnen dürfte. Aus diesem Grunde wird in neuerer Zeit der unter B besprochenen Methode für höchste Genauigkeitsansprüche der Vorzug gegeben. Die Behauptung, daß bei der Messung mit Gitter die Schichtverziehungen eliminiert wurden, ist vielfach angezweifelt worden. Jedenfalls können nur solche Verzerrungen eliminiert

werden, die sich über große Teile der Platte erstrecken. Gegenüber lokalen ist das Gitterverfahren ebenso machtlos wie jedes andere.

B Messung rechtwinkliger Koordinaten ohne Gitter. Hierfür werden Apparate benutzt, deren Meßorgane (Skalen oder Schrauben) den ganzen Bereich der Platte umfassen und direkt rechtwinklige Koordinaten angeben. Das System der gemessenen Koordinaten ist also durch die Meßorgane und die Lage der Platte im Apparat definiert. Skalen werden für genaueste Messungen deswegen bevorzugt, weil die durch Schmiermittel bedingte Unsicherheit der Schraube entfällt und die Skalen keiner Abnutzung unterliegen. Andererseits ist bei Schrauben die Meßgeschwindigkeit im allgemeinen größer. Bei den bisher bekannten Apparaten für Messung rechtwinkliger Koordinaten ohne Gitter konnte jeweils nur eine Koordinate genau gemessen werden, die andere genähert zur Identifikation, zur Messung in der anderen Koordinatenrichtung mußte die Platte um 90° gedreht werden. Neuerdings baut jedoch die Fa. CARL ZEISS einen Apparat, welcher an zwei Skalen beide Koordinaten gleichzeitig angibt¹.

C Messung in anderen Koordinatensystemen. Soweit die oben genannten Meßapparate mit Positionskreis versehen sind, können sie selbstverständlich auch zur Messung von Polarkoordinaten (Positionswinkel und Distanz) dienen.

Einen auf einem ganz anderen Prinzip beruhenden Apparat hat KAPLEYN^{2, 3} angegeben. Er besteht aus einem kleinen Aquatoreal, welches derart gebaut ist, daß sich Stunden-, Deklinations- und optische Achse des Fernrohrs in einem Punkt schneiden. Die Platte wird nun so aufgestellt, daß sich dieser Punkt senkrecht über dem Tangentialpunkt (vgl. hierüber Abschnitt c) befindet, und zwar in einer Entfernung gleich der Brennweite des zur Aufnahme verwandten Objektivs. Dann können bei passender Orientierung der Platte mit den Kreisen des Aquatoreals direkt (scheinbare) Rektaszensions- und Deklinationsdifferenzen gemessen werden. In der Praxis bereitet die Justierung des Apparates manche Schwierigkeiten und gelingt naturgemäß nur genähert. Zur Berücksichtigung der Abweichungen sind aber ziemlich komplizierte Formeln erforderlich, so daß das KAPLEYNsche Verfahren sich trotz seiner theoretischen Eleganz nicht eingebürgert hat.

Dasselbe Ziel, das KAPLEYN bei idealer Justierung in aller Strenge erreichen wurde, erzielt SCHILFSINGER⁴ näherungsweise mit einem Apparat folgender Konstruktion. Das Instrument muß in einem ebenen Polarkoordinatensystem, dessen Pol an die Stelle gebracht wird, wo auf der hinreichend erweiterten Platte der Himmelspol liegen würde. Dann sind die gemessenen Winkel in guter Näherung den Rektaszensionsdifferenzen, die gemessenen Distanzen den Deklinationsdifferenzen proportional. In niedrigen Deklinationen ist der Apparat unbrauchbar, da er in diesem Fall riesige Dimensionen erhalten mußte. Genauere Messungen sind mit dem Apparat, soweit dem Verfasser bekannt ist, nicht gemacht worden, doch hat SCHILFSINGER das Prinzip bei seinen photographischen Neubeobachtungen der AG-Kataloge mit Erfolg zur raschen Identifizierung der Sterne benutzt.

c) Tangentiale Koordinaten und ihre Transformation.

7 Definition der Tangentialkoordinaten. Die von einem fehlerfreien Objektiv auf der photographischen Platte erzeugte Abbildung eines Teils der Himmelskugel ist eine Zentralprojektion vom Kugelmittelpunkt auf eine Tangentialebene. Es liegt daher nahe, in der Astrophotographie außer den allgemein

¹ A N 246, S. 237 (1932)

² Bull. Carte du ciel 1, S. 94, 377, 401

³ SCHILFINGER, Die Photographie der Gestirne, S. 135 (1897)

⁴ M N 86, S. 372 (1926)

üblichen sphärischen Koordinaten auch rechtwinklige Koordinaten der Sterne in einer Tangentialebene einzuführen. Soweit nicht ausdrücklich anderes bemerkt ist, soll ein derartiges Tangentialkoordinatensystem durch folgende Festsetzungen definiert sein:

1 Das System sei ein rechtwinkliges kartesisches Koordinatensystem, welches in einer die Kugel berührenden Ebene liegt und den Tangentialpunkt zum Ursprung hat.

2 Die Maßeinheit sei der Radius der Kugel (In μ axi gegeben durch die Brennweite des abbildenden Objektivs).

3 Die Y -Achse berühre den durch den Tangentialpunkt gehenden Deklinationskreis. Ihre positive Hälfte weise in diejenige Richtung, in welcher der Abstand des Tangentialpunkts vom Nordpol des Himmels $< 180^\circ$ ist.

4 Die positive Hälfte der X -Achse weise in die Richtung wachsender Rektaszension.

5 Als Tangentialkoordinaten X, Y eines Kugelpunktes P gelten die nach 1 bis 4 gerechneten Koordinaten des durch Zentralprojektion von Kugelmittelpunkt auf die Tangentialebene entstandenen Bildpunktes P' von P (vgl. Abb 1).

In sämtlichen Formeln dieses Kapitels gilt ebenso wie für Tangentialkoordinaten auch für alle Winkelgrößen der Radius als Einheit, wenn nicht eine andere Einheit ausdrücklich angegeben ist. Zur rechnerischen Anwendung wird die Bogensekunde oder eine andere Winkleinheit meist vorzuziehen sein, es müssen also die betreffenden Faktoren ($\sin 1''$, $\sin^2 1''$ usw.) jeweils hinzugefügt werden.

8 Beziehung zwischen zwei Tangentialkoordinatensystemen Die zwischen zwei tangentialen Koordinatensystemen bestehenden Transformationsformeln sollen zunächst in ihrer allgemeinsten Form, ohne Rücksicht auf die in der vorigen Ziffer unter 3 und 4 festgelegte spezielle Orientierung gegenüber dem Himmelspol abgeleitet werden.

Es sei in Abb 1 $TX Y$ ein tangentiales Koordinatensystem. Diesem ordnen wir zu ein rechtwinkliges raumliches Koordinatensystem $Oxyz$, dessen Ursprung der Kugelmittelpunkt ist, dessen positive z -Achse durch T geht und dessen x - und y -Achsen den entsprechenden Achsen des tangentialen Systems parallel und gleichgerichtet sind. Werden jetzt die Tangentialkoordinaten eines Punktes P der Kugelfläche mit X, Y , seine raumlichen Koordinaten mit x, y, z bezeichnet, so ergibt sich aus der Figur, da der Radius der Kugel die Einheit ist,

$$X = \frac{x}{z}, \quad Y = \frac{y}{z} \quad (1)$$

Hieraus folgt unter Beachtung der Kugelgleichung ($x^2 + y^2 + z^2 = 1$) durch Quadrieren und Addieren

$$1 + X^2 + Y^2 = \frac{1}{z^2} \quad \text{oder} \quad \frac{1}{z} = \sqrt{1 + X^2 + Y^2}$$

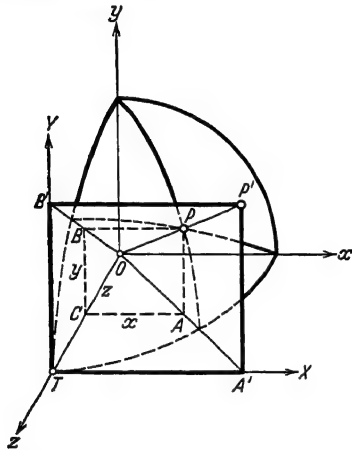


Abb 1 Zur Definition der Tangentialkoordinaten, P' ist der durch Zentralprojektion von O aus entstandene Bildpunkt von P . Zuordnung von raumlichem Koordinatensystem $Oxyz$ und tangentialem Koordinatensystem $TX Y$.

$$X = TA' = \tan \angle AOC = \frac{x}{z},$$

$$Y = TB' = \tan \angle BOC = \frac{y}{z}$$

Diesen Wert setzen wir in (1) ein und erhalten

$$x = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \lambda^2 + Y^2}}, \quad y = \frac{Y}{\sqrt{1 + \lambda^2 + Y^2}}, \quad z = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda^2 + Y^2}} \quad (2)$$

Es sei jetzt ein zweites tangentiales Koordinatensystem X', Y' mit zugeordnetem räumlichen Koordinatensystem x', y', z' gegeben. Dann gelten für diese Systeme analog

$$x' = \frac{\lambda'}{\sqrt{1 + \lambda'^2 + Y'^2}}, \quad y' = \frac{Y'}{\sqrt{1 + \lambda'^2 + Y'^2}}, \quad z' = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda'^2 + Y'^2}} \quad (2')$$

Die Lage der beiden Systeme x, y, z und x', y', z' sei nun definiert durch folgendes Schema der Richtungskosinus

	x	y	z
x'	α_1	α_2	α_3
y'	β_1	β_2	β_3
z'	γ_1	γ_2	γ_3

Dann bestehen die Gleichungen

$$\left. \begin{aligned} x' &= \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 z, \\ y' &= \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_3 z, \\ z' &= \gamma_1 x + \gamma_2 y + \gamma_3 z \end{aligned} \right\} \quad (3) \quad \left| \quad \begin{aligned} x &= \alpha_1' x' + \beta_1' y' + \gamma_1' z', \\ y &= \alpha_2' x' + \beta_2' y' + \gamma_2' z', \\ z &= \alpha_3' x' + \beta_3' y' + \gamma_3' z' \end{aligned} \right\} \quad (3')$$

Die gesuchten Beziehungen zwischen X, Y und X', Y' entstehen sofort, wenn (2) und (2') in (3) und (3') eingesetzt und jeweils die ersten beiden so erhaltenen Gleichungen durch die letzte dividiert werden. Es ergibt sich

$$X' = \frac{\alpha_1 X + \alpha_2 Y + \alpha_3}{\gamma_1 X + \gamma_2 Y + \gamma_3}, \quad Y' = \frac{\beta_1 X + \beta_2 Y + \beta_3}{\gamma_1 X + \gamma_2 Y + \gamma_3} \quad (4)$$

$$X = \frac{\alpha_1' X' + \beta_1' Y' + \gamma_1'}{\alpha_3' X' + \beta_3' Y' + \gamma_3'}, \quad Y = \frac{\alpha_2' X' + \beta_2' Y' + \gamma_2'}{\alpha_3' X' + \beta_3' Y' + \gamma_3'} \quad (4')$$

Wir betrachten nun den spezielleren Fall, daß die beiden tangentialen Systeme gemäß den obigen Definitionen zum Himmelspol orientiert seien und daß ihre relative Lage festgelegt sei durch die Deklinationen \mathfrak{D} und \mathfrak{D}' der Tangentialpunkte sowie deren Rektaszensionsdifferenz \mathfrak{M} . Die in (4) und (4') auftretenden Richtungskosinus müssen in diesem Fall durch \mathfrak{D} , \mathfrak{D}' und \mathfrak{M} ausgedrückt werden. Die gesuchte Darstellung ergibt sich aus Abb. 2, in welcher P der Himmelspol, T und T' die beiden Tangentialpunkte seien. Das dem tangentialen System T zugeordnete räumliche Koordinatensystem $Oxyz$ wird in das zu T' gehörige System $Ox'y'z'$ in folgender Weise überführt. Wir drehen $Oxyz$ um die x -Achse um den Winkel \mathfrak{D} , so daß es die Lage $O\xi\eta\zeta$ einnimmt. Ox und $O\xi$ fallen also zusammen. $O\xi\eta\zeta$ drehen wir um die η -Achse um den Winkel \mathfrak{M} bis zur Lage $O\xi'\eta'\zeta'$, wieder

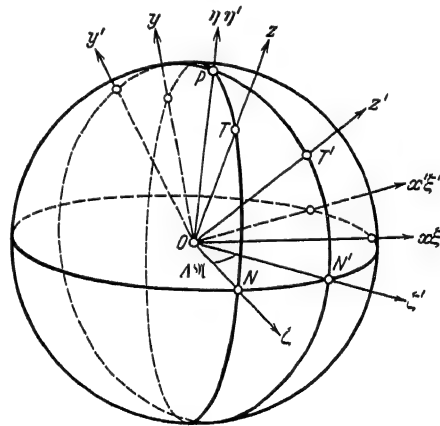


Abb. 2 Zur Darstellung der Richtungskosinus zwischen den Systemen $Oxyz$ und $Ox'y'z'$ durch \mathfrak{D} , \mathfrak{D}' und \mathfrak{M} . $NT = \mathfrak{D}$, $N'T' = \mathfrak{D}'$, $\angle NON' = \mathfrak{M}$

fallen zwei Achsen ($O\eta$ und $O\eta'$) zusammen Endlich geht dieses System in $Ox'y'z'$ über durch Drehung um die Achse $O\xi' = O\xi$ um den Winkel \mathfrak{D}' Die Richtungskosinus der verschiedenen Achsen gegeneinander lassen sich an Hand der Abb 2 leicht in folgende Schemata einordnen

I				II				III			
	x	y	z		ξ	η	ζ		ξ'	η'	ζ'
ξ	1	0	0	ξ'	$\cos \Delta \mathfrak{U}$	0	$-\sin \Delta \mathfrak{U}$	ξ'	1	0	0
η	0	$\cos \mathfrak{D}$	$\sin \mathfrak{D}$	η'	0	1	0	η'	0	$\cos \mathfrak{D}'$	$-\sin \mathfrak{D}'$
ζ	0	$-\sin \mathfrak{D}$	$\cos \mathfrak{D}$	ζ'	$\sin \Delta \mathfrak{U}$	0	$\cos \Delta \mathfrak{U}$	ζ'	0	$\sin \mathfrak{D}'$	$\cos \mathfrak{D}'$

Aus I und II ergeben sich die Richtungskosinus zwischen $Oxyz$ und $O\xi'\eta'\zeta'$ auf Grund des Satzes, daß der Winkel φ zwischen zwei Geraden im Raume, deren Richtungskosinus, bezogen auf ein beliebiges rechtwinkliges Koordinatensystem, $\alpha\beta\gamma$ und $\alpha'\beta'\gamma'$ sind, gegeben ist durch die Gleichung

$$\cos \varphi = \alpha \alpha' + \beta \beta' + \gamma \gamma'$$

	x	y	z
ξ'	$\cos \Delta \mathfrak{U}$	$\sin \mathfrak{D} \sin \Delta \mathfrak{U}$	$-\cos \mathfrak{D} \sin \Delta \mathfrak{U}$
η'	0	$\cos \mathfrak{D}$	$\sin \mathfrak{D}$
ζ'	$\sin \Delta \mathfrak{U}$	$-\sin \mathfrak{D} \cos \Delta \mathfrak{U}$	$\cos \mathfrak{D} \cos \Delta \mathfrak{U}$

Wird dieses Schema in gleicher Weise mit III verbunden, so entsteht das gesuchte System der in (4) und (4') auftretenden Richtungskosinus

	x	y	z
x'	$\cos \Delta \mathfrak{U}$	$\sin \mathfrak{D} \sin \Delta \mathfrak{U}$	$-\cos \mathfrak{D} \sin \Delta \mathfrak{U}$
y'	$-\sin \mathfrak{D}' \sin \Delta \mathfrak{U}$	$\cos \mathfrak{D} \cos \mathfrak{D}' + \sin \mathfrak{D} \sin \mathfrak{D}' \cos \Delta \mathfrak{U}$	$\sin \mathfrak{D} \cos \mathfrak{D}' - \cos \mathfrak{D} \sin \mathfrak{D}' \cos \Delta \mathfrak{U}$
z'	$\cos \mathfrak{D}' \sin \Delta \mathfrak{U}$	$\cos \mathfrak{D} \sin \mathfrak{D}' - \sin \mathfrak{D} \cos \mathfrak{D}' \cos \Delta \mathfrak{U}$	$\sin \mathfrak{D} \sin \mathfrak{D}' + \cos \mathfrak{D} \cos \mathfrak{D}' \cos \Delta \mathfrak{U}$

Eine ähnliche Darstellung der Richtungskosinus ergibt sich, wenn die Lage von T' gegenüber T durch die Distanz s und die Positionswinkel P und P' definiert ist, welche der Großkreis TT' in den Punkten T und T' bildet Die Ableitung ist der obigen ganz analog, $Oxyz$ ist in diesem Falle durch folgende Drehungen in die Lage $Ox'y'z'$ überzuführen

- 1 Drehung um die z -Achse um den Winkel $90^\circ - P$, bis die xz -Ebene mit der des Großkreises TT' zusammenfällt Das entstandene System heiße $O\xi\eta\zeta$
- 2 Drehung von $O\xi\eta\zeta$ um seine η -Achse um den Winkel s , bis die ζ -Achse durch T' geht Das entstandene System heiße $O\xi'\eta'\zeta'$
- 3 Drehung von $O\xi'\eta'\zeta'$ um seine ζ' -Achse um den Winkel $90^\circ - P'$ im entgegengesetzten Sinne wie bei 1 Damit ist $Oxyz$ in $Ox'y'z'$ übergeführt

Ähnliche Betrachtungen, wie sie oben angestellt wurden, führen zu einer Darstellung der Richtungskosinus durch s , P und P'

	x	y	z
x'	$\cos P \cos P' + \sin P \sin P' \cos s$	$-\sin P \cos P' + \cos P \sin P' \cos s$	$-\sin P' \sin s$
y'	$-\cos P \sin P' + \sin P \cos P' \cos s$	$\sin P \sin P' + \cos P \cos P' \cos s$	$-\cos P' \sin s$
z'	$\sin P \sin s$	$\cos P \cos s$	$\cos s$

Diese Ausdrücke liefern eine wichtige Vereinfachung der Formeln (4) in dem praktisch häufigen Fall, daß die Tangentialpunkte nahe benachbart sind. Ist nämlich s so klein, daß s^2 vernachlässigt werden kann, so ergibt sich, wenn $P' - P = \Delta P$ gesetzt wird

$$\begin{array}{l|l} \alpha_1 = \cos \Delta P & \beta_1 = -\sin \Delta P \\ \alpha_2 = \sin \Delta P & \beta_2 = \cos \Delta P \end{array}$$

Hiermit folgen aus den bekannten, zwischen den Richtungskosinus zweier rechtwinkliger räumlicher Koordinatensysteme bestehenden Gleichungen

$$\alpha_3 = \beta_1 \gamma_2 - \beta_2 \gamma_1,$$

$$\beta_3 = \gamma_1 \alpha_2 - \gamma_2 \alpha_1$$

für α_3 und β_3 die Werte

$$\alpha_3 = -\gamma_1 \cos \Delta P - \gamma_2 \sin \Delta P,$$

$$\beta_3 = \gamma_1 \sin \Delta P - \gamma_2 \cos \Delta P$$

Da ferner, mit Vernachlässigung von s^2 , $\gamma_3 = \cos s = 1$ gesetzt werden darf, so gehen die Formeln (4) über in

$$\left. \begin{array}{l} X' = \frac{(X - \gamma_1) \cos \Delta P + (Y - \gamma_2) \sin \Delta P}{1 + \gamma_1 X + \gamma_2 Y}, \\ Y' = \frac{-(X - \gamma_1) \sin \Delta P + (Y - \gamma_2) \cos \Delta P}{1 + \gamma_1 X + \gamma_2 Y} \end{array} \right\} \quad (5)$$

In diesen Formeln sind $\gamma_1 = \sin s \sin P$ und $\gamma_2 = \sin s \cos P$ klein, so daß ihre Quadrate und Produkte zu vernachlässigen sind. Gleiches gilt für ΔP , wenn die Umgebung des Pols ausgeschlossen wird. Unter dieser Voraussetzung kann man setzen

$$\begin{array}{l|l|l} \cos \Delta P = 1 & \gamma_1 \cos \Delta P = \gamma_1 & \gamma_2 \cos \Delta P = \gamma_2 \\ \sin \Delta P = \Delta P & \gamma_1 \sin \Delta P = 0 & \gamma_2 \sin \Delta P = 0 \end{array}$$

Außerdem gilt stets

$$1 + \gamma_1 X + \gamma_2 Y = 1 - (\gamma_1 X + \gamma_2 Y)$$

Hiermit vereinfachen sich die Gleichungen (5) weiter zu

$$\left. \begin{array}{l} X' = X - \gamma_1 + Y \Delta P - (\gamma_1 X + \gamma_2 Y) X, \\ Y' = Y - \gamma_2 - X \Delta P - (\gamma_1 X + \gamma_2 Y) Y \end{array} \right\} \quad (6)$$

Der Übergang von einem Tangentialkoordinatensystem zu einem anderen mit nahe benachbartem Tangentialpunkt läßt sich also geometrisch beschreiben durch

- 1 Eine Nullpunktverschiebung um die (kleinen) Beträge γ_1 und γ_2
- 2 Eine Drehung um den Winkel ΔP
- 3 Eine kleine, aber von den Koordinaten abhängige Änderung der Maßeinheit

Wichtig ist für später eine geometrische Deutung von γ_1 und γ_2 . Setzt man in (6) $X' = Y' = 0$, so folgt (immer unter Vernachlässigung der quadratischen und höheren Glieder) $X = \gamma_1$ und $Y = \gamma_2$. Der Ursprung des gestrichenen Systems hat also im ungestrichenen die Koordinaten γ_1 und γ_2 .

9 Transformation der Tangentialkoordinaten in A R und Dekl und umgekehrt Es seien α, δ A R und Dekl eines Sterns, X, Y seine tangentialen Koordinaten, bezogen auf den Tangentialpunkt T , welcher die A R \mathfrak{A} und die

Dekl \mathfrak{D} habe Zur Ableitung der Transformationsformeln zwischen α, δ und X, Y betrachten wir ein zweites tangentiales Koordinatensystem X', Y' , dessen

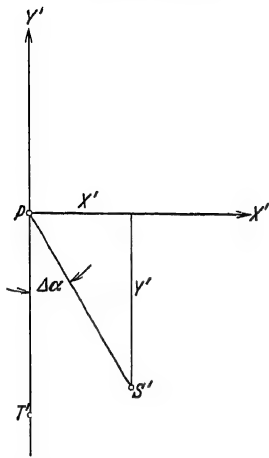


Abb 3 Beziehung zwischen X', Y' und α, δ T' und S' sind die Zentralprojektionen des Tangentialpunkts bzw Sterns vom Kugelmittelpunkt auf die im Himmelspol P tangierende $X'Y'$ -Ebene $PS' = \cotg \delta$, $\angle T'PS' = \alpha - \mathfrak{A} = \Delta \alpha$

Ursprung der Himmelspol P sei Da die in Ziff 7 gegebene Definition der Orientierung tangentialer Koordinaten hier ihren Sinn verliert, setzen wir fest, daß die X' -Achse der X -Achse parallel und gleichgerichtet, die Y' -Achse senkrecht zur X' -Achse derart gerichtet sei, daß die Y' -Koordinate des Punktes T negativ ist Die Beziehung zwischen X', Y' und α, δ ergibt sich aus Abb 3, welche die Verhältnisse in der im Pol P tangierenden $X'Y'$ -Ebene darstellt Es ist $PS' = \cotg \delta$ und $\angle T'PS' = \alpha - \mathfrak{A} = \Delta \alpha$, folglich gilt

$$\left. \begin{aligned} X' &= \cotg \delta \sin \Delta \alpha, \\ Y' &= -\cotg \delta \cos \Delta \alpha \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Andererseits bestehen zwischen X', Y' und X, Y die Gleichungen (4) und (4') der vorigen Ziffer Die dort auftretenden Richtungskosinus lassen sich ohne weiteres aus Abb 4 ablesen, es entsteht folgendes Schema

	x	y	z
x'	1	0	0
y'	0	$\sin \mathfrak{D}$	$-\cos \mathfrak{D}$
z'	0	$\cos \mathfrak{D}$	$\sin \mathfrak{D}$

Hiermit folgt aus (4) und (4')

$$X = \frac{X'}{\sin \mathfrak{D} - Y' \cos \mathfrak{D}}, \quad Y = \frac{\cos \mathfrak{D} + Y' \sin \mathfrak{D}}{\sin \mathfrak{D} - Y' \cos \mathfrak{D}} \quad (8)$$

$$X' = \frac{X}{Y \cos \mathfrak{D} + \sin \mathfrak{D}}, \quad Y' = \frac{Y \sin \mathfrak{D} - \cos \mathfrak{D}}{Y \cos \mathfrak{D} + \sin \mathfrak{D}} \quad (8')$$

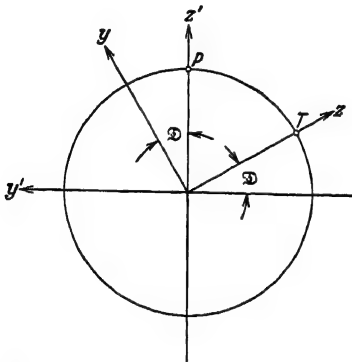


Abb 4 Zur Ableitung der Richtungskosinus für die Transformation von X, Y in X', Y' und umgekehrt P = Himmelspol, T = Tangentialpunkt Die zusammenfallenden x - und x' -Achsen stehen auf der Zeichenebene senkrecht

Wird jetzt (7) in (8) eingesetzt, so entstehen die gesuchten Formeln zur Verwandlung von α, δ in X, Y

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{\cos \delta \sin \Delta \alpha}{\sin \mathfrak{D} \sin \delta + \cos \mathfrak{D} \cos \delta \cos \Delta \alpha}, \\ Y &= \frac{\cos \mathfrak{D} \sin \delta - \sin \mathfrak{D} \cos \delta \cos \Delta \alpha}{\sin \mathfrak{D} \sin \delta + \cos \mathfrak{D} \cos \delta \cos \Delta \alpha} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Die Umkehrungen ergeben sich durch Einsetzen von (7) in (8'), man erhält zunächst

$$\left. \begin{aligned} \cotg \delta \sin \Delta \alpha &= \frac{X}{\sin \mathfrak{D} + Y \cos \mathfrak{D}}, \\ \cotg \delta \cos \Delta \alpha &= \frac{\cos \mathfrak{D} - Y \sin \mathfrak{D}}{\sin \mathfrak{D} + Y \cos \mathfrak{D}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

und hieraus

$$\left. \begin{aligned} \tg \Delta \alpha &= \frac{X}{\cos \mathfrak{D} - Y \sin \mathfrak{D}}, \\ \tg \delta &= \frac{\sin \mathfrak{D} + Y \cos \mathfrak{D}}{\cos \mathfrak{D} - Y \sin \mathfrak{D}} \cos \Delta \alpha \end{aligned} \right\} \quad (9')$$

Um zu einer von $\Delta\alpha$ freien Formel für δ zu gelangen, welche später noch benötigt wird, quadrieren und addieren wir die Gleichungen (10) und erhalten

$$\cotg^2 \delta = \frac{X^2 + (\cos \mathfrak{D} - Y \sin \mathfrak{D})^2}{(\sin \mathfrak{D} + Y \cos \mathfrak{D})^2}$$

Hieraus folgt durch Einsetzen in die Identität

$$\sin \delta = \frac{1}{\sqrt{1 + \cotg^2 \delta}},$$

nach passender Umformung

$$\sin \delta = \frac{\sin \mathfrak{D} + Y \cos \mathfrak{D}}{\sqrt{1 + X^2 + Y^2}} \quad (11)$$

10. Umformung der Transformationsformeln in Ziff 9 für numerische Zwecke Die Gleichungen (9), (9') und (11), welche die Aufgabe, tangentielle Koordinaten in α, δ und umgekehrt zu verwandeln, theoretisch lösen, sind zur numerischen Rechnung nicht gut geeignet. Selbst bei Maschinenrechnung ist der Übergang von absolutem Maß auf Bogensekunden oder eine andere Winkereinheit recht lastig. Trotz der großen Zahl der von den verschiedenen Autoren angegebenen Umformungen und Hilfstafeln¹ dürfte es unmöglich sein, eine in allen Fällen gleich bequeme Rechenvorschrift zu finden. Die in der Praxis vorliegenden Verhältnisse sind eben zu vielgestaltig, als daß sich ein einziges Schema für alle eignen konnte. Wir müssen uns hier auf die Darlegung der wichtigsten Methoden beschränken, ohne auf Einzelheiten des Rechenschemas einzugehen. Die Umgestaltung der Formeln ist auf zwei grundsätzlich verschiedenen Wegen möglich: A durch Einführung von Hilfsgrößen und B durch Reihenentwicklungen.

A Einführung von Hilfsgrößen Setzt man $\tg q = Y$ und $\mathfrak{d} = \mathfrak{D} + q$, so erhält man aus (9') ein Formelsystem, das ebensogut zur Verwandlung von X, Y in α, δ wie auch zur Lösung der umgekehrten Aufgabe dienen kann, es entsteht nämlich

$$\left. \begin{aligned} \tg q &= Y, \\ \mathfrak{d} &= \mathfrak{D} + q, \\ \tg \Delta \alpha &= X \sec \mathfrak{d} \cos q, \\ \tg \delta &= \tg \mathfrak{d} \cos \Delta \alpha \end{aligned} \right\} \quad (12')$$

Dieselben Formeln, für die Umkehrung geschrieben, lauten

$$\left. \begin{aligned} \tg \mathfrak{d} &= \tg \delta \sec \Delta \alpha, \\ q &= \mathfrak{d} - \mathfrak{D}, \\ X &= \tg \Delta \alpha \cos \mathfrak{d} \sec q, \\ Y &= \tg q \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Die Rechnung nach (12) und (12') ist bei Benutzung von Hilfstafeln, welche die Reduktion der in Bogensekunden ausgedruckten Tangente auf den Bogen geben, sehr einfach. Solche Tafeln sind im Anhang I mitgeteilt und finden sich auch an anderen Stellen^{2,3}. Unbequem ist bei diesen Gleichungen nur, daß man die kleine Differenz zwischen \mathfrak{d} und δ nicht unmittelbar erhält, sondern zu dem

¹ Vgl. das Verzeichnis am Schluß von Anhang I

² ALBRECHT, Formeln und Hilfstafeln, 3 Aufl. (1894), Tafel 42. Entsprechende, für logarithmische Rechnung bestimmte Tafeln s. ALBRECHT, 1. c. Tafel 42 und 4 Aufl. (1908), Tafel 40. Vgl. auch das Verzeichnis am Schluß von Anhang I.

³ Veröff. d. astron. Recheninst. Berlin-Dahlem Nr. 47 (1929).

Umweg über die Funktionen $\operatorname{tg} d$ und $\operatorname{tg} \delta$ gezwungen ist, was bei 0'',01 Genauigkeit siebenstellige Rechnung erfordert

J PETERS¹ vermeidet diesen Ubelstand nach dem Vorgang von C VICK² durch Einführung einer weiteren Hilfsgröße v , definiert durch $\operatorname{tg} v = X \cos q$, oder hiermit identisch $\sin v = \sin \Delta \alpha \cos \delta$. Es entstehen aus (12) und (12') folgende Formelsysteme

$$\left. \begin{aligned} \sin v &= \sin \Delta \alpha \cos \delta, \\ \sin(d - \delta) &= \operatorname{tg} v \operatorname{tg} \frac{\Delta \alpha}{2} \sin \delta, \\ q &= d - \mathfrak{D}, \\ X &= \operatorname{tg} v \sec q, \\ Y &= \operatorname{tg} q \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Und umgekehrt

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} q &= Y, \\ d &= \mathfrak{D} + q, \\ \operatorname{tg} v &= X \cos q, \\ \operatorname{tg} \Delta \alpha &= \operatorname{tg} v \sec d, \\ \sin(\delta - d) &= -\sin v \operatorname{tg} \frac{\Delta \alpha}{2} \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (13')$$

Umfangreiche, von J PETERS¹ herausgegebene Hilfstafeln erleichtern die Rechnung nach den Formeln (13) und (13') bedeutend. Besonders angenehm ist, daß die Verwandlung von Bogenmaß in Zeitmaß und umgekehrt entfällt, da die betreffenden Faktoren in die Tabellen für $\sec q$ und $\cos q$ mit einbezogen sind. Für Massenrechnungen dürfte der PETERSsche Weg der bequemste sein. Doch führen bei beschränkterer Zahl der Transformationen (12) und (12') oder eine der im folgenden besprochenen Methoden vielleicht rascher zum Ziel, da die Tabellen von PETERS immerhin einige Einarbeitung und ein sorgfältig angelegtes Rechenschema erfordern.

B Reihenentwicklungen. Andere Formeln zur direkten Berechnung von $d - \delta$ erhält man durch Anwendung der bekannten Reihen³

$$\eta = \xi + \operatorname{tg}^2 \frac{\varepsilon}{2} \sin 2\xi + \frac{1}{2} \operatorname{tg}^4 \frac{\varepsilon}{2} \sin 4\xi + \dots, \quad \operatorname{tg} \eta = \sec \varepsilon \operatorname{tg} \xi,$$

$$\eta = \xi - \operatorname{tg}^2 \frac{\varepsilon}{2} \sin 2\xi + \frac{1}{2} \operatorname{tg}^4 \frac{\varepsilon}{2} \sin 4\xi - \dots, \quad \operatorname{tg} \eta = \cos \varepsilon \operatorname{tg} \xi$$

auf die Gleichungen für d und δ in (12) bzw (12'). Hiermit entsteht

$$\left. \begin{aligned} d &= \delta + \operatorname{tg}^2 \frac{\Delta \alpha}{2} \sin 2\delta + \frac{1}{2} \operatorname{tg}^4 \frac{\Delta \alpha}{2} \sin 4\delta, \\ q &= d - \mathfrak{D}, \\ X &= \operatorname{tg} \Delta \alpha \cos d \sec q, \\ Y &= \operatorname{tg} q \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

und

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} q &= Y, \\ d &= \mathfrak{D} + q, \\ \operatorname{tg} \Delta \alpha &= X \sec d \cos q, \\ \delta &= d - \operatorname{tg}^2 \frac{\Delta \alpha}{2} \sin 2d + \frac{1}{2} \operatorname{tg}^4 \frac{\Delta \alpha}{2} \sin 4d \end{aligned} \right\} \quad (14')$$

¹ Veröff d astron Recheninst Berlin-Dahlem Nr 47 (1929)

² Mitt Hamb Sternw 5, Nr 19 (1924)

³ BRUNNOW, Lehrbuch der sphärischen Astronomie, S 16 (1880)

Die vernachlässigten Glieder der Reihen bleiben unter $0'',01$ für $\Delta\alpha \leq 30^m$. Mit den in Anhang I gegebenen Hilfstafeln rechnet man nach (14) und (14') sehr bequem.

Die Anwendung von Reihenentwicklungen, welche X und Y unmittelbar durch $\Delta\alpha = \alpha - \mathfrak{A}$ und $\Delta\delta = \delta - \mathfrak{D}$ oder umgekehrt ausdrücken, hat für numerische Zwecke nur dann Wert, wenn die Glieder 4. Ordnung entfallen und die Glieder 3. Ordnung so klein sind, daß wenige Stellen zur Berechnung genügen. Für scharfe Rechnung kommen die Reihen also nur bei sehr kleinen Plattenfeldern (bis höchstens $1^\circ \times 1^\circ$) in Frage. Anders ist es bei genäherter Rechnung (z. B. für Identifikationszwecke), hier können die Reihen bis zu $10^\circ \times 10^\circ$ Feldgröße mit Vorteil verwandt werden. In hohen Deklinationen sind sie selbstverständlich unbrauchbar. Die Tafeln 5 und 6 in Anhang I, welche bei der Rechnung nach den Reihen zu benutzen sind, gehen daher nur bis zu $\mathfrak{D} = 60^\circ$.

Entsprechend den vorstehenden Bemerkungen soll die Entwicklung der Reihen auf die Glieder 1 bis 3. Ordnung einschließlich beschränkt werden. Eine Reihe für $\Delta\alpha$ läßt sich sehr einfach aus der ersten der Gleichungen (9') herleiten, die wir in etwas veränderter Form schreiben

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \Delta\alpha &= \frac{X \sec \mathfrak{D}}{1 - Y \operatorname{tg} \mathfrak{D}} = X \sec \mathfrak{D} (1 + Y \operatorname{tg} \mathfrak{D} + Y^2 \operatorname{tg}^2 \mathfrak{D} + \dots), \\ \operatorname{tg} 1\alpha &= X \sec \mathfrak{D} + XY \sec \mathfrak{D} \operatorname{tg} \mathfrak{D} + XY^2 \sec \mathfrak{D} \operatorname{tg}^2 \mathfrak{D} \end{aligned}$$

Dieser Ausdruck ist noch in die Arkustangensreihe $x = \operatorname{tg} x - \frac{1}{3} \operatorname{tg}^3 x + \dots$ einzusetzen, womit sich ergibt

$$\Delta\alpha = X \sec \mathfrak{D} + XY \sec \mathfrak{D} \operatorname{tg} \mathfrak{D} - \frac{1}{3} X^3 \sec^3 \mathfrak{D} + XY^2 \sec \mathfrak{D} \operatorname{tg}^2 \mathfrak{D} \quad (15a)$$

Die entsprechende Reihe für $\Delta\delta$ folgt aus (11), wir entwickeln zunächst den Nenner

$$\begin{aligned} \sin \delta &= \frac{\sin \mathfrak{D} + Y \cos \mathfrak{D}}{\sqrt{1 + X^2 + Y^2}} = (\sin \mathfrak{D} + Y \cos \mathfrak{D}) \left[1 - \frac{1}{2} (X^2 + Y^2) + \dots \right], \\ \sin \delta &= \sin \mathfrak{D} + Y \cos \mathfrak{D} - \frac{1}{2} (X^2 + Y^2) \sin \mathfrak{D} - \frac{1}{2} (X^2 + Y^2) Y \cos \mathfrak{D} \end{aligned}$$

Nun gilt ganz allgemein¹

$$\eta = \xi + \frac{a}{\cos \xi} + \frac{1}{2} \operatorname{tg} \xi \frac{a^2}{\cos^2 \xi} + \frac{1}{6} (1 + 3 \operatorname{tg}^2 \xi) \frac{a^3}{\cos^3 \xi} + \dots, \quad \sin \eta = \sin \xi + a$$

Setzt man, diesen Ausdruck auf den vorliegenden Fall anwendend,

$$\eta = \delta, \quad \xi = \mathfrak{D}, \quad a = Y \cos \mathfrak{D} - \frac{1}{2} (X^2 + Y^2) \sin \mathfrak{D} - \frac{1}{2} (X^2 + Y^2) Y \cos \mathfrak{D},$$

so entsteht nach einigen Umformungen

$$\Delta\delta = Y - \frac{1}{2} X^2 \operatorname{tg} \mathfrak{D} - \frac{1}{2} X^2 Y \sec^2 \mathfrak{D} - \frac{1}{6} Y^3 \quad (15b)$$

Zur Ableitung der Reihen für X und Y kann man von den Gleichungen (9) ausgehen. Bequemer aber ist es, wenigstens bei beschränkter Gliederzahl, die sieben erhaltenen Reihen in sukzessiver Näherung umzukehren, hierfür sind (15a) und (15b) in folgender Form zu schreiben

$$\begin{aligned} X &= \Delta\alpha \cos \mathfrak{D} - XY \operatorname{tg} \mathfrak{D} + \frac{1}{3} X^3 \sec^2 \mathfrak{D} - XY^2 \operatorname{tg}^2 \mathfrak{D}, \\ Y &= \Delta\delta + \frac{1}{2} X^2 \operatorname{tg} \mathfrak{D} + \frac{1}{2} X^2 Y \sec^2 \mathfrak{D} + \frac{1}{6} Y^3 \end{aligned}$$

¹ BRÜNNOW, Lehrbuch der sphärischen Astronomie, S. 18 (1880)

Die erste Näherung lautet also $X = \Delta\alpha \cos \mathfrak{D}$, $Y = \Delta\delta$, durch Einsetzen in die rechten Seiten folgt

$$X = \Delta\alpha \cos \mathfrak{D} - \Delta\alpha \Delta\delta \sin \mathfrak{D},$$

$$Y = \Delta\delta + \frac{1}{2} \Delta\alpha^2 \sin \mathfrak{D} \cos \mathfrak{D},$$

und schließlich

$$\left. \begin{aligned} X &= \Delta\alpha \cos \mathfrak{D} - \Delta\alpha \Delta\delta \sin \mathfrak{D} + \frac{1}{8} \Delta\alpha^3 \cos \mathfrak{D} (3 \cos^2 \mathfrak{D} - 1), \\ Y &= \Delta\delta + \frac{1}{2} \Delta\alpha^2 \sin \mathfrak{D} \cos \mathfrak{D} + \frac{1}{2} \Delta\alpha^2 \Delta\delta \cos 2\mathfrak{D} + \frac{1}{8} \Delta\delta^3 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Zur numerischen Auswertung der Reihen (15a), (15b) und (16) dienen die Tafeln 1, 5 und 6, Anhang I (vgl. die Erläuterungen dort)

Eine noch weitergehende Vereinfachung der Rechnung, als sie die bisher erwähnten Tafeln geben, die für beliebige Deklinationen des Tangentialpunktes verwendbar sind, läßt sich erzielen, wenn für einen Tangentialpunkt oder für eine Reihe von Tangentialpunkten gleicher Deklination sehr viele Transformationen auszuführen sind. In solchen Fällen lohnt sich die Herstellung von Spezialtafeln für das betreffende \mathfrak{D} . Derartige Tafeln sind in verschiedener Anordnung besonders für die photographische Himmelskarte aufgestellt worden. Sie gründen sich teils auf die strengen Formeln (9), (9') und (12), (12'), teils auf die Reihen (15a), (15b) und (16), auch Kombinationen der beiden Formelarten werden benutzt. Bezüglich der Einrichtung im einzelnen muß auf die Tafeln selbst und die ihnen beigegebenen Erläuterungen verwiesen werden¹⁻⁴.

Zu erwähnen ist noch ein von GRAFF⁵ angegebenes graphisches Verfahren zur Transformation tangentialer Koordinaten in α, δ , welches bei geringeren Ansprüchen an Genauigkeit und bei engen Plattenfeldern sehr bequem ist. Es leistet sogar noch mehr als die bisher besprochenen Methoden, da es nicht unbedingt an die Voraussetzung gebunden ist, daß die zu transformierenden Koordinaten tangentiale sind, sondern die gemessenen Koordinaten unter Berücksichtigung der an sie anzubringenden Verbesserungen (wegen Skalenwert, Orientierung, Refraktion usw., vgl. Abschnitt d) unmittelbar in α, δ zu verwandeln gestattet.

Bisweilen werden Formeln benötigt, die bei festgehaltenem Tangentialpunkt die Änderungen von $\Delta\alpha, \Delta\delta$ durch die entsprechenden von X und Y ausdrücken. Werden diese Änderungen mit $d\alpha, d\delta$ bzw. dX, dY bezeichnet, so liefern die Gleichungen (15a) und (15b)

$$\Delta\alpha + d\alpha = (X + dX) \sec \mathfrak{D} + (X + dX)(Y + dY) \sec \mathfrak{D} \operatorname{tg} \mathfrak{D} - \frac{1}{8} (X + dX)^3 \sec^3 \mathfrak{D} + (X + dX)(Y + dY)^2 \sec \mathfrak{D} \operatorname{tg}^2 \mathfrak{D},$$

$$\Delta\delta + d\delta = Y + dY - \frac{1}{2} (X + dX)^2 \operatorname{tg} \mathfrak{D} - \frac{1}{2} (X + dX)^2 (Y + dY) \sec^2 \mathfrak{D} - \frac{1}{8} (Y + dY)^3$$

Hieraus folgt, wenn die in dX, dY quadratischen Glieder, die zugleich noch eine Koordinate selbst enthalten, und die höheren vernachlässigt werden,

$$\left. \begin{aligned} d\alpha &= dX \sec \mathfrak{D} + (XdY + YdX) \sec \mathfrak{D} \operatorname{tg} \mathfrak{D} - X^2 dX \sec^3 \mathfrak{D} \\ &\quad + (Y^2 dX + 2XYdY) \sec \mathfrak{D} \operatorname{tg}^2 \mathfrak{D} + dX dY \sec \mathfrak{D} \operatorname{tg} \mathfrak{D}, \\ d\delta &= dY - XdX \operatorname{tg} \mathfrak{D} - \frac{1}{2} (X^2 dY + 2XYdX) \sec^2 \mathfrak{D} - Y^2 dY - \frac{1}{2} dX^2 \operatorname{tg} \mathfrak{D} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

¹ Siehe das Verzeichnis von Hilfstafeln zur Koordinatentransformation am Schlusse von Anhang I

² ZURHELLEN, Darleg u. Kritik usw., S. 92 (1904)

³ JACOBY, Bull. Carte du ciel 3, S. 1 (1902)

⁴ RAYET, Ann. Obs. Bordeaux 9, (1900)

⁵ A. N. 211, S. 241 (1920)

d) Verbesserungen der gemessenen Koordinaten.

11. Übersicht über die verschiedenen Verbesserungen. Die Reduktion einer photographischen Himmelsaufnahme zerfällt in zwei Teile 1 die Verwandlung der gemessenen Koordinaten in tangentiale, und 2 die Verwandlung der tangentialen Koordinaten in A R und Dekl, falls man nicht überhaupt bei den Tangentialkoordinaten stehenbleiben will¹. Da der zweite Teil in Ziff 9 und 10 bereits erledigt ist, haben wir uns nur noch mit dem ersten zu beschäftigen. Die hierfür an die gemessenen Koordinaten anzubringenden Verbesserungen lassen sich in zwei Gruppen einteilen

α) „Instrumentelle“ Verbesserungen, d h solche, die von dem Aufnahmeinstrument und seinem Zustand während der Aufnahme abhängen. Dies sind

- a) Skalenwert,
- b) Orientierung,
- c) Nullpunktsfehler,
- d) Plattenneigung

β) „Sphärische“ Verbesserungen, d h solche, die von astronomischen Einflüssen abhängen. Dies sind

- e) Refraktion,
- f) Aberration,
- g) Präzession und Nutation

Für die Verbesserungen der zweiten Gruppe lassen sich Formeln herleiten, welche die Berechnung, wenn nicht in aller Strenge, so doch in theoretisch beliebig weit zu treibender Näherung gestatten, und zwar lediglich auf Grund der bekannten Aufnahmedaten. In den Formeln der ersten Gruppe muß jedoch mindestens ein Teil der Koeffizienten empirisch mit Hilfe von Sternen, deren Orte bereits bekannt sind („Anhaltsterne“), bestimmt werden.

α) Instrumentelle Verbesserungen.

12 Skalenwert, Orientierung und Nullpunktsfehler. Für alle folgenden Betrachtungen soll von der KAPTEJNSCHEN und SCHLESINGERSCHEN Methode² der Plattenausmessung abgesehen und vorausgesetzt werden, daß das System der gemessenen Koordinaten rechtwinklig ist und daß die beiden Koordinaten in derselben Maßeinheit ausgedrückt sind³. Ferner soll angenommen werden, daß etwaige Fehler der Meßapparatur bestimmt und rechnerisch berücksichtigt wurden.

Maßeinheit und Orientierung tangentialer Koordinaten sind definitionsmäßig festgelegt, während diese Daten bei den gemessenen Koordinaten x und y vom Meßapparat abhängen. An x und y sind also die Verbesserungen Δx , Δy anzubringen, welche folgende Form haben

$$\Delta x = A x + B y,$$

$$\Delta y = -B x + A y$$

Dieselben Überlegungen wie für Maßeinheit und Orientierung gelten auch für den Nullpunkt der gemessenen Koordinaten. Sind diese also nicht schon auf den Tangentialpunkt bezogen, so hat das System x , y eine Parallelverschiebung zu erfahren. Eine solche Nullpunktsänderung wird bei der Reduktion einer

¹ In dieser Weise ist z B KÜSTNER bei seinen Arbeiten über Sternhaufen vorgegangen. Vgl. Bonner Veroff Nr 14 (1920).

² Vgl. Ziff 6 dieses Kapitels.

³ Fälle, in denen diese Voraussetzung nicht erfüllt ist, werden in Ziff 20 dieses Kapitels behandelt werden.

Platte stets vorgenommen, und zwar aus folgendem Grunde. Für die spätere Verwandlung in $A R$ und $Dekl$ muß der Ort des Tangentialpunktes am Himmel, also die Großen \mathfrak{A} und \mathfrak{D} in den Formeln der Ziff 9 und 10 mit derselben Scharfe bekannt sein, die für die abzuleitenden Sternörter gefordert wird. Diese Genauigkeit zu erreichen, ist aber nicht möglich. Allerdings wäre es denkbar, von genähernten Werten für \mathfrak{A} und \mathfrak{D} ausgehend, deren Verbesserungen aus den bekannten Anhaltsternörtern abzuleiten. Doch würde die Genauigkeit dieses recht umständlichen Verfahrens nur eine formale sein, da effektiv natürlich höchstens diejenige Scharfe erzielt wird, mit der man die Lage des Tangentialpunktes auf der Platte kennt. Es ist aber, wie in der folgenden Ziffer gezeigt wird, weder möglich noch nötig, den Tangentialpunkt so genau festzulegen.

Man geht daher praktisch anders vor und definiert als „rechnerischen“ Tangentialpunkt denjenigen Punkt der Platte, dessen $A R$ und $Dekl$ mit den angenommenen Werten \mathfrak{A} und \mathfrak{D} in aller Strenge übereinstimmen. Infolge dieser Fiktion eines Nullpunktsfehlers sind an x und y konstante Verbesserungen anzubringen, die obigen Formeln also folgendermaßen zu ergänzen

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= Ax + By + C, \\ \Delta y &= -Bx + Ay + D \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Die Großen A (Skalenwert), B (Orientierung), C und D (Nullpunktsfehler) sind zunächst unbekannt, müssen also auf irgendeine Weise bestimmt werden. Für A liefert zwar die Brennweite des Objektivs einen guten Näherungswert, daß aber eine zur Reduktion der Platte hinreichende Genauigkeit durch direkte Messung der Brennweite ohne Kenntnis von Anhaltsternörtern nicht erreichbar ist, liegt auf der Hand. Zur Bestimmung von B ist jedoch ein von Anhaltsternen unabhängiges Verfahren vorgeschlagen und auch gelegentlich angewandt worden¹. Man hält nach beendeter Aufnahme den Stundenantrieb des Instruments an, so daß die helleren Sterne ihre Spuren auf der Platte aufzeichnen. Aus dem bei der Messung der Platte zu ermittelnden Winkel zwischen der Sternspur (scheinbarer Parallel) und einer Koordinatenachse läßt sich dann der Wert von B ableiten. Bei diesem Verfahren sind systematische Fehler in den Messungen der Sternspur kaum vermeidbar, so daß die der Platte an sich innewohnende Genauigkeit nicht voll ausgenutzt werden kann. Unbedingt vorzuziehen ist daher die gegenwärtig stets angewandte Methode, alle vier Konstanten zugleich aus den Anhaltsternen abzuleiten (vgl. hierüber Ziff 20).

Es ist nun nicht nur bei dieser Konstantenbestimmung rechentechnisch vorteilhaft, sondern für alle folgenden Formelentwicklungen fast unerläßlich, vorauszusetzen, daß A , B , C und D klein sind. Mit anderen Worten: Die gemessenen Koordinaten dürfen sich von den tangentialen nur wenig unterscheiden. B läßt sich durch passendes Einlegen der Platte in den Meßapparat stets klein halten, für die übrigen Konstanten sind notigenfalls Näherungswerte zu ermitteln, mit denen die gemessenen Koordinaten gemäß (18) vor weiterer Behandlung zu verbessern sind.

An dieser Stelle ist noch eine wichtige Bemerkung zu machen. Die Formeln (18) besagen, daß die gemessenen Koordinaten einer linearen orthogonalen Transformation zu unterwerfen sind, deren Koeffizienten empirisch mit Hilfe von Anhaltsternen ermittelt werden. Es hindert also nichts, in (18) auch andere an x und y anzubringende Korrekturen (z. B. Präzession) mit hineinbeziehen, soweit es die Gestalt der Korrekturformeln zulaßt. Bei der Reduktion einer

¹ J. SCHEINER, Der große Sternhaufen im Hercules, Messier 13. Abhandl. Preuß. Akad. Wiss. (1892).

Platte können folglich alle Korrekturen entfallen, welche sich durch eine lineare orthogonale Transformation darstellen lassen. Es wird sich noch zeigen, daß hierdurch die Berechnung der Präzession vollständig, der Aberration bis auf höhere Glieder sowie eines Teils der Refraktion erspart wird. Allerdings geht dann die geometrische Bedeutung der Konstanten A und B verloren, doch ist dies praktisch belanglos, da es nur ausnahmsweise erforderlich sein wird, die zahlenmäßigen Beträge der unverfälschten Konstanten zu kennen.

13 Plattenneigung Die Einführung eines „rechnerischen“ Tangentialpunktes an Stelle des wahren ist, wie schon aus der Definition der Tangentialkoordinaten folgt, theoretisch unzulässig. Praktisch entstehen jedoch keine merklichen Fehler, wenn nur der rechnerische Tangentialpunkt dem wahren hinreichend nahe benachbart ist. Es sind also Formeln zu entwickeln, welche den Einfluß der Abweichung des angenommenen Tangentialpunktes von seiner vorgeschriebenen Lage auf die Koordinaten zu berechnen gestatten. Wir haben demnach folgende Aufgabe zu behandeln.

Gegeben sei eine Platte, deren wahrer Tangentialpunkt T_1 sei. Die auf ihr gemessenen Koordinaten x, y sollen aber auf den von T_1 verschiedenen Punkt T_2 als Ursprung bezogen sein. Zu berechnen sind die Koordinaten ξ und η , welche auf einer fiktiven Platte, deren wahrer Tangentialpunkt T_2 ist, erhalten worden waren.

Da die fiktive und die wahre Platte gegeneinander geneigt sind, so soll die jetzt zu erörternde Erscheinung im Gegensatz zu dem schon erwähnten Nullpunktsfehler mit „Plattenneigung“ bezeichnet werden, obwohl in der Literatur oft beide unter dem Namen Nullpunktsfehler zusammengefaßt werden.

Zur Lösung der gestellten Aufgabe definieren wir ein weiteres Koordinatensystem x_1, y_1 , dessen Nullpunkt T_1 sei und dessen Achsen denen des Systems x, y parallel seien. Dann gilt

$$x_1 = x - p, \quad y_1 = y - q, \quad (19)$$

worin p und q die Koordinaten von T_1 , bezogen auf den Nullpunkt T_2 , bedeuten. Wir nehmen weiter an, daß ξ, η und x_1, y_1 Tangentialkoordinaten sind, also deren vorgeschriebene Maßeinheit und Orientierung besitzen. Diese Annahme legt nach (19) auch x und y entsprechende Bedingungen auf, die Anwendbarkeit der Formeln wird dadurch aber praktisch nicht beschränkt, da ja Skalen- und Orientierungsfehler der gemessenen Koordinaten stets als so klein vorausgesetzt werden, daß die höheren Glieder nicht beeinflußt werden (vgl. Ziff 12). Zwischen ξ, η und x_1, y_1 bestehen nach (6) in Ziff 8 folgende Gleichungen

$$\begin{aligned} \xi &= x_1 - y_1 + y_1 AP - (\gamma_1 x_1 + \gamma_2 y_1) x_1, \\ \eta &= y_1 - x_2 - x_1 AP - (\gamma_1 x_1 + \gamma_2 y_1) y_1 \end{aligned}$$

Hierin können $+y_1 AP$ und $-x_1 AP$ fortfallen, da sie nur eine Orientierungsänderung, d. h. eine lineare orthogonale Transformation darstellen. Werden ferner in den ersten Gliedern x_1 und y_1 durch die Werte (19) ersetzt, so folgt

$$\begin{aligned} \xi &= x - p - y_1 - (\gamma_1 x_1 + \gamma_2 y_1) x_1, \\ \eta &= y - q - x_2 - (\gamma_1 x_1 + \gamma_2 y_1) y_1 \end{aligned}$$

γ_1 und γ_2 sind nach Ziff 8 die Koordinaten von T_2 , bezogen auf T_1 , also $\gamma_1 = -p, \gamma_2 = -q$. Unter Vernachlässigung der Quadrate von p und q können ferner die Indizes an x und y in den letzten Gliedern fortbleiben, und wir erhalten, wenn noch $\xi - x = \Delta x$ und $\eta - y = \Delta y$ gesetzt wird, die Formeln

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= (px + qy)x, \\ \Delta y &= (px + qy)y, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

in welchen, wie schon erwähnt, p und q die Koordinaten des wahren Tangentialpunkts im System x, y darstellen

Die Plattenneigung äußert sich also durch eine vom Ort auf der Platte abhängige Änderung des Skalenwertes, da der Einfluß mit den Koordinaten quadratisch wächst, so ist bei großen Plattenfeldern der Spielraum für die Annahme des rechnerischen Tangentialpunktes sehr gering. Die Größen p und q müssen also mit erheblicher Genauigkeit bekannt sein, wie die folgende Zusammenstellung zeigt, in welcher die aus (20) unter der vereinfachenden Annahme $q = 0$ folgenden Maximalbeträge der Korrekturen angegeben sind

$p =$		10"	20"	40"	60"
Plattenfeld	$1^\circ \times 1^\circ$	0',001	0',002	0',003	0',005
	2×2	0,003	0,006	0,012	0,018
	5×5	0,02	0,04	0,08	0,11
	10×10	0,08	0,15	0,30	0,46

Laßt man z B bei einem Plattenfeld von $10^\circ \times 10^\circ$ einen Fehler von 0',1 im Sternort zu, so darf nach den Werten der Tabelle der rechnerische Tangentialpunkt vom wahren höchstens 12" abweichen. Um dies zu erreichen, mußte die Lage des wahren Tangentialpunkts auf der Platte mit etwa 10" Genauigkeit bekannt sein, da man den noch verbleibenden Spielraum von 2" für die Konstanten C und D der Formeln (18) braucht. Der Ort des Tangentialpunkts am Himmel läßt sich zwar leicht so genau bestimmen (vgl. Ziff 19), daß C und D in den gezogenen Grenzen bleiben, Schwierigkeiten bereitet aber die Ermittlung seiner Lage auf der Platte. Hierfür sind bisher folgende drei grundsätzlich verschiedene Wege besprochen worden

1 Ein experimenteller, von OLSSON¹ angegebener Weg, Verfeinerungen dieser Methoden wurden von KUSTNER² und SCHLESINGER³ vorgeschlagen

2 Rechnerische Ableitung von p und q aus Anhaltsternen

3 Bestimmung von p und q durch besonders angeordnete Aufnahmen

Das OLSSONSCHE Verfahren gründet sich auf die Überlegung, daß der Tangentialpunkt praktisch gegeben ist als Fußpunkt des Lotes, gefällt vom Zentrum des Objektivs auf die Plattenebene. Man legt nun die Platte genau wie bei der Aufnahme in die beiderseits geöffnete Kassette, während vor das Objektiv in möglichst geringem Abstand eine Blende gesetzt wird, welche ein kleines, genau zentrisch liegendes Loch hat. Der Durchmesser des Loches ist so zu bemessen, daß es vom Kassettenende aus als deutlich sichtbarer Lichtpunkt erscheint. Gleichzeitig mit der Blende erblickt das von hinten auf die Platte schauende Auge das von der Glassseite der Platte erzeugte Spiegelbild der Augenpupille. Durch seitliches Verschieben des Auges ist jetzt dies Spiegelbild mit dem Blendenloch scheinbar zur Deckung zu bringen. Dann liegen die drei Punkte Augenpupille, deren Spiegelbild und Blendenloch auf einer Geraden, die auf der Platte senkrecht steht, also durch den Tangentialpunkt gehen muß. Die betreffende Stelle der Platte wird nun in geeigneter Weise, z B durch einen Tintenpunkt, markiert. Beim Ausmessen der Platte ist diese Marke mitzumessen, womit p und q bekannt sind. Wegen mancher Fehlerquellen⁴ läßt sich der Tangentialpunkt nach der OLSSONSCHE Methode nur bei Plattenfeldern bis zu etwa $2^\circ \times 2^\circ$ hinreichend sicher bestimmen.

¹ ZURHELLEN, Darlegung u Kritik usw., S 71 (1904), A N 146, S 137 (1898)

² A KONIG u O HECKMANN, Untersuchung des vierlinsigen Objektivs usw. V J S 63, S 279 (1928)

³ Yale Obs Transactions 4, S 5 (1925)

⁴ ZURHELLEN, I c S 73, vgl auch A N 179, S 309 (1908)

Höhere Genauigkeit (für Felder von $5^\circ \times 5^\circ$ und mehr ausreichend) liefert eine von KUSTNER für die photographische Wiederbeobachtung des A G -Kataloges eingeführte Modifikation des OLSSONschen Verfahrens. Hierbei wird das Auge durch ein mit Okularschraubenmikrometer ausgerüstetes Fernrohr ersetzt, welches direkt die Ränder der Objektivfassung anvisiert. Ferner wird der Tangentialpunkt nicht von Hand, sondern indirekt mittels einer mechanischen Vorrichtung markiert¹. SCHLESINGER² ist bei der Reduktion der von ihm neu beobachteten Teile des A G -Kataloges in ganz ähnlicher Weise vorgegangen.

Die rechnerische Ableitung von p und q aus den Anhaltsternen ist in Ziff 21 behandelt. Um sichere Resultate zu erhalten, ist bei dieser Methode, wie hier schon vorweggenommen werden soll, eine große Zahl von Anhaltsternen mit genau bekannten Örtern notwendig, wodurch die praktische Anwendung beschränkt wird.

Das dritte Verfahren ist von Anhaltsternen völlig unabhängig, es erfordert jedoch ad hoc hergestellte Aufnahmen, welche folgendermaßen anzuordnen sind. Zwei Sterne a und b von nahezu gleicher A R und einer Deklinationsdifferenz, die wenig kleiner als die halbe Plattenseite ist, seien zweimal auf dieselbe Platte derart aufgenommen, daß bei der einen Aufnahme Stern b , bei der zweiten Stern a möglichst in die Nahe des angenommenen Tangentialpunkts fällt. Es entsteht die in Abb 5 schematisch dargestellte Anordnung. Sind s_1 und s_2 die aus den beiden Aufnahmen folgenden und auf die Sphäre reduzierten Längen der Sternstrecke \overline{ab} , s_0 die vom Einfluß einer etwa bestehenden Plattenneigung freie Streckenlänge, so gilt nach (20)

$$s_0 = s_1 + (y_{a1}^2 - y_{b1}^2)q = s_2 + (y_{a2}^2 - y_{b2}^2)q, \quad (21)$$

wenn die Koordinaten gemäß den Bezeichnungen in Abb 5 durch Indizes unterschieden werden. Es ist nun, wenn die beiden Aufnahmen annähernd symmetrisch zu dem angenommenen Tangentialpunkt liegen, zulässig, für y_{a1} und y_{b2} einen gemeinsamen Näherungswert y einzusetzen, ferner die Quadrate der als klein vorausgesetzten Koordinaten y_{a2} und y_{b1} zu vernachlässigen. Dann folgt aus (21) die Bestimmungsgleichung für q

$$2y^2q = s_2 - s_1$$

Die Großen y , s_1 und s_2 lassen sich aus den auf der Platte gemessenen Ordinaten sofort berechnen. Zur Verwandlung in Bogensekunden genügt stets ein genäherter, aus der Brennweite abzuleitender Skalenwert, die Reduktion der „tangential“ gemessenen Strecken auf die Sphäre geschieht sehr einfach mit Hilfe der Werte τ (Tafel 1, Anhang I). Ein besonderer Vorzug dieser Methode ist, daß man ohne die Kenntnis der Sternörter auskommt und daß die Platte nur in einer Koordinatenrichtung vermessen zu werden braucht. Schwierigkeiten bereitet lediglich die Auswahl geeigneter Sternpaare. Hierin ist man besonders bei der Bestimmung von p , für die analog in der x -Richtung angeordnete Aufnahmen erforderlich sind, oft behindert, denn hier tritt als beschränkende Bedingung

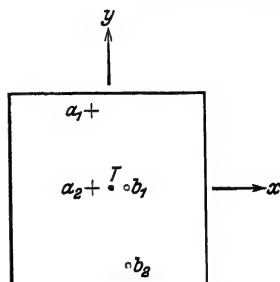


Abb 5 Bestimmung von p und q durch „Streckenverschiebung“. T = angenommener Tangentialpunkt. a_1b_1 = erste Aufnahme, a_2b_2 = zweite Aufnahme der Sternstrecke ab . a_2 , T , b_1 müssen in Wirklichkeit dicht beieinander liegen und sind nur der Übersichtlichkeit halber weit getrennt gezeichnet.

¹ A. KÖNIG u. O. HECKMANN, Untersuchung des vierlinsigen Objektivs usw. VJS 63 S. 279 (1928).

² Yale Obs Transactions 4, S. 5 (1925).

noch hinzu, daß die Sterne nahe am Himmelsaquator liegen müssen, da andernfalls die „Streckenverschiebung“ nicht auf einem großen Kreis erfolgt¹

Zur Bestimmung des Tangentialpunkts auf der einzelnen Platte kommt die Streckenverschiebungsmethode naturgemäß nicht in Frage, ist aber zur Kontrolle der anderweitig bestimmten Werte von p und q wertvoll. Dies gilt besonders bei drei- und vierlinsigen Objektiven, wo eine Plattenneigung durch Zentrierfehler vorgetauscht werden kann. Es handelt sich dabei selbstverständlich nicht um eine reelle Verlagerung des Tangentialpunkts, sondern um einen Abbildungsfehler, welcher durch Gleichungen von der Form (20) darstellbar oder wenigstens gut approximierbar ist.

Das Streckenverschiebungsverfahren kann übrigens prinzipiell zur Bestimmung eines jeden nicht mit den Koordinaten linear verlaufenden Bildfehlers dienen. Z. B. läßt sich die Verzeichnung auf diesem Wege bestimmen².

β) Sphärische Verbesserungen

14 Allgemeines über die photographische Refraktion. Den Betrag der photographischen Refraktion erhält man nach den Untersuchungen von WILSING³ und HENRY⁴ aus dem der visuellen durch Multiplikation mit einem konstanten Faktor κ , als dessen zur Zeit besten Wert man das Mittel aus den genannten beiden Bestimmungen, nämlich $\kappa = 1,0155$, annehmen kann. Die photographische Refraktion läßt sich also, ebenso wie die visuelle, sowohl als Funktion der scheinbaren Zenitdistanz (z), wie auch der wahren (ζ) darstellen. Ist $\Delta z = \zeta - z$ der Gesamtbetrag der Refraktion, so gilt hiernach

$$\Delta z = \beta \operatorname{tg} \zeta = b \operatorname{tg} z$$

Die Koeffizienten β und b sind mit der Zenitdistanz schwach veränderlich. In größeren Zenitdistanzen muß diese Veränderung auch innerhalb des Plattenfeldes berücksichtigt werden. ZURHELLEN⁵, dem wir die bisher vollständigste Entwicklung der Refraktionsformeln verdanken, setzt zu diesem Zweck

$$\beta = \beta_0 + \beta' \operatorname{tg}^2 \zeta \quad \text{und entsprechend} \quad b = b_0 + b' \operatorname{tg}^2 z,$$

d. h. er vernachlässigt in der Reihenentwicklung der Refraktion nach Potenzen von $\operatorname{tg} z$ die Glieder 5. und höherer Ordnung und weist nach, daß bei Plattenfeldern von $2^\circ \times 2^\circ$ und Zenitdistanzen $\leq 73^\circ$ der Fehler dieses Ansatzes unter $0'',04$ bleibt. Für größere Plattenfelder kann der maximale Einfluß der vernachlässigten Glieder nebenstehender Übersicht⁶ entnommen werden, in welcher z die Zenitdistanz des Plattenzentrums bedeutet.

z	Plattenfeld			
	$2^\circ \times 2^\circ$	$5^\circ \times 5^\circ$	$7^\circ \times 7^\circ$	$10^\circ \times 10^\circ$
65°	—	0'',02	0'',02	0'',05
66	—	0,03	0,03	0,07
67	—	0,03	0,05	0,09
68	—	0,03	0,06	0,12
69	0'',01	0,04	0,08	0,17
70	0,02	0,05	0,11	0,26
71	0,03	0,08	0,16	—
72	0,03	0,11	0,23	—
73	0,04	0,17	—	—

Da die Refraktion in Richtung der Zenitdistanz wirkt, so liegt es nahe, zur Ableitung der Refraktionsformeln tangentele Koordinaten einzuführen, bei denen die Y-Achse zum Zenit gerichtet ist, die also aus den „normalen“ Tangentialkoordinaten (nach der Definition in Ziff 7) durch Drehung um den parallaktischen Winkel am Tangential-

feldern von $2^\circ \times 2^\circ$ und Zenitdistanzen $\leq 73^\circ$ der Fehler dieses Ansatzes unter $0'',04$ bleibt. Für größere Plattenfelder kann der maximale Einfluß der vernachlässigten Glieder nebenstehender Übersicht⁶ entnommen werden, in welcher z die Zenitdistanz des Plattenzentrums bedeutet.

¹ Über die Behandlung solcher Fälle vgl. V J S 63, S 289 (1928).

² V J S 63, S 291 (1928).

³ A N 145, S 273 (1898).

⁴ Bull. Carte du Ciel 1, S 464.

⁵ Darlegung und Kritik usw., S 7 (1904).

⁶ Die Zahlenwerte sind erhalten aus den von DE BALL [Lehrbuch der sphärischen Astronomie, S 219 (1912)] gegebenen Konstanten (A_2) und (A_3), umgerechnet auf photographische Refraktion mit $\kappa = 1,0155$.

punkt hervorgehen. Verschiedene Autoren¹⁻⁴ haben nicht nur in verschiedenen Tangentialebenen, sondern auch auf der Sphere rechtwinklige Koordinaten eingeführt in Analogie zu den in der Geodäsie üblichen SOLDNERSchen Koordinaten. Einfacher und durchsichtiger ist ein zuerst von TURNER⁵ zur Ableitung der Refraktionsformeln beschrittener Weg, welcher sphärische Koordinaten vermeidet und dafür Tangentialkoordinaten, bezogen auf das Zenit als Nullpunkt, benutzt. Die TURNERSchen Formeln sind jedoch, wie ZURHELLEN⁶ nachgewiesen hat, infolge eines grundsätzlichen Irrtums unrichtig. Neuerdings hat HECKMANN⁷ unabhängig von TURNER eine strenge Entwicklung der Refraktionsformeln gegeben, ebenfalls unter Benutzung rechtwinkliger Koordinaten in einer im Zenit tangierenden Ebene.

Im folgenden gehen wir, dem HECKMANNschen Gedankengang uns anschließend, von den zenital orientierten, scheinbaren und auf den scheinbaren Tangentialpunkt bezogenen Koordinaten aus und transformieren sie in die auf das Zenit bezogenen Koordinaten. Diese befreien wir von Refraktion, was hier deswegen besonders einfach ist, weil die Refraktion zum Zenit radialsymmetrisch verläuft. Die so erhaltenen wahren Koordinaten transformieren wir rückwärts auf den wahren Tangentialpunkt. Endlich gehen wir von diesen zenital orientierten auf normale, zum Pol orientierte Koordinaten („polare“ Koordinaten) über.

Als gegeben sind hierbei zu betrachten die scheinbaren polaren Tangentialkoordinaten und der wahre Ort des Tangentialpunktes, als aus den Aufnahmedaten (Deklination, Stundenwinkel und Sternzeit) folgend. Gesucht sind die wahren polaren Tangentialkoordinaten. Der mathematische Zusammenhang zwischen gegebenen und gesuchten Größen ist so kompliziert, daß an eine strenge Behandlung des Problems nicht gedacht werden kann. Die endgültigen, numerisch anzuwendenden Gleichungen müssen also in Reihen entwickelt werden, es ist daher festzusetzen, welche Glieder mitzunehmen und welche zu vernachlässigen sind. Bezeichnet K allgemein eine Koordinate auf der Platte, so sollen mitgeführt werden die Glieder von der Ordnung βK , βK^2 , βK^3 , $\beta' K$,

alle übrigen aber, also z. B. die Glieder von der Ordnung $\beta^2 K$, $\beta' K^2$, $\beta\beta' K$ usw., entfallen. Von diesen sind im allgemeinen am stärksten $\beta^2 K$ und $\beta' K^2$, sie sind in den ZURHELLENschen⁸ Entwicklungen mitgeführt und dort zu entnehmen, falls sie ausnahmsweise gebraucht werden sollten.

Bei der Ableitung der Refraktionsformeln werden folgende Bezeichnungen benutzt

	Wahr	Scheinbar
Zenitdistanz des Sterns	$\zeta_1 - z_1 + \Delta z_1$	$z_1 - \zeta_1 - \Delta z_1$
„ „ Tangentialpunkts	$\zeta - z + \Delta z$	$z - \zeta - \Delta z$
Parallaktischer Winkel am Tangentialpunkt	χ	h
Refraktionskoeffizient für den Stern	β_1	b_1
„ „ „ Tangentialpunkt	β	b
Polare Tangentialkoordinaten des Sterns	$\left\{ \begin{array}{l} \xi - \alpha + \Delta \alpha \\ \eta - \gamma + \Delta \gamma \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \alpha \\ \gamma \end{array} \right.$
Zenitalc „ „ „	$\left\{ \begin{array}{l} u + \Delta u \\ v + \Delta v \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} u \\ v \end{array} \right.$
Auf das Zenit bezogene Tangentialkoordinaten des Sterns	$\left\{ \begin{array}{l} U + \Delta U \\ V + \Delta V \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} U \\ V \end{array} \right.$

¹ HENRY, Bull Carte du Ciel 2, S 303 ² BAILLAUD, Bull Carte du Ciel 3, S 40 (1902)

³ ZURHELFEN, Darlegung und Kritik usw., S 3 (1904)

⁴ RAYET, Ann Obs Bordeaux 9 (1900) ⁵ M N 57, S 133 (1897)

⁶ ZURHELLEN, I c S 33

⁷ Nachr Ges Wiss Göttingen Math-Phys Kl (1932), Fachgr I, Nr 34, zugleich Veröff Univ-Sternw Göttingen II 30

⁸ I c S 23

Weiter folgt aus $\operatorname{tg} \varphi = \frac{V}{U}$ nach bekannten goniometrischen Identitäten und nach (26)

$$\left. \begin{aligned} \cos \varphi &= \frac{U}{\sqrt{U^2 + V^2}} = \frac{U}{\operatorname{tg} z_1}, \\ \sin \varphi &= \frac{V}{\sqrt{U^2 + V^2}} = \frac{V}{\operatorname{tg} z_1} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Wir führen (27) und (29) in (28) ein und erhalten, wenn zur Abkürzung noch

$$\varrho = \frac{\operatorname{tg} \zeta_1 - \operatorname{tg} z_1}{\operatorname{tg} z_1} \quad (30)$$

gesetzt wird, die Ausdrücke

$$\left. \begin{aligned} \Delta U &= \varrho U, \\ \Delta V &= \varrho V \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Mit diesen Werten schreiben sich die Gleichungen (25')

$$\begin{aligned} u + \Delta u &= \frac{U(1 + \varrho)}{\cos \zeta - V \sin \zeta (1 + \varrho)}, \\ v + \Delta v &= \frac{\sin \zeta + V \cos \zeta (1 + \varrho)}{\cos \zeta - V \sin \zeta (1 + \varrho)} \end{aligned}$$

Hierin ersetzen wir U, V durch die Werte (24) und erhalten

$$\begin{aligned} u + \Delta u &= \frac{\frac{u(1 + \varrho)}{v \sin z + \cos z}}{\cos \zeta - \frac{v \cos z - \sin z}{v \sin z + \cos z} \sin \zeta (1 + \varrho)}, \\ v + \Delta v &= \frac{\sin \zeta + \frac{v \cos z - \sin z}{v \sin z + \cos z} \cos \zeta (1 + \varrho)}{\cos \zeta - \frac{v \cos z - \sin z}{v \sin z + \cos z} \sin \zeta (1 + \varrho)} \end{aligned}$$

oder nach passender Umformung

$$\left. \begin{aligned} u + \Delta u &= \frac{u \sec z \sec \zeta (1 + \varrho)}{1 + v \operatorname{tg} z - (v - \operatorname{tg} z) \operatorname{tg} \zeta (1 + \varrho)}, \\ v + \Delta v &= \frac{(1 + v \operatorname{tg} z) \operatorname{tg} \zeta + (v - \operatorname{tg} z) (1 + \varrho)}{1 + v \operatorname{tg} z - (v - \operatorname{tg} z) \operatorname{tg} \zeta (1 + \varrho)} \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

In diesen völlig strengen Gleichungen ist nun z und ϱ durch ζ, β und β' auszudrücken. Nach (22) ist

$$z = \zeta - \beta \operatorname{tg} \zeta$$

Da wir β^2 vernachlässigen, so folgt

$$\operatorname{tg} z = \operatorname{tg} \zeta - \beta \operatorname{tg} \zeta \frac{d \operatorname{tg} \zeta}{d \zeta} = \operatorname{tg} \zeta - \beta \operatorname{tg} \zeta \sec^2 \zeta,$$

$$\sec z = \sec \zeta - \beta \operatorname{tg} \zeta \frac{d \sec \zeta}{d \zeta} = \sec \zeta - \beta \operatorname{tg}^2 \zeta \sec \zeta$$

Hiermit gehen die Formeln (32) über in

$$\begin{aligned} u + \Delta u &= \frac{u(\sec^2 \zeta - \beta \operatorname{tg}^2 \zeta \sec^2 \zeta)(1 + \varrho)}{1 + v \operatorname{tg} \zeta - \beta v \operatorname{tg} \zeta \sec^2 \zeta - (v - \operatorname{tg} \zeta + \beta \operatorname{tg} \zeta \sec^2 \zeta) \operatorname{tg} \zeta (1 + \varrho)}, \\ v + \Delta v &= \frac{(1 + v \operatorname{tg} \zeta - \beta v \operatorname{tg} \zeta \sec^2 \zeta) \operatorname{tg} \zeta + (v - \operatorname{tg} \zeta + \beta \operatorname{tg} \zeta \sec^2 \zeta)(1 + \varrho)}{1 + v \operatorname{tg} \zeta - \beta v \operatorname{tg} \zeta \sec^2 \zeta - (v - \operatorname{tg} \zeta + \beta \operatorname{tg} \zeta \sec^2 \zeta) \operatorname{tg} \zeta (1 + \varrho)}. \end{aligned}$$

Da gemäß (30) ϱ von der Größenordnung β ist, also $\varrho\beta$ vernachlässigt werden kann, so lassen sich diese Gleichungen nach Beseitigung der Klammern umformen zu

$$u + \Delta u = \frac{u - \beta u \operatorname{tg}^2 \zeta + \varrho u}{1 - \beta v \operatorname{tg} \zeta - \beta \operatorname{tg}^2 \zeta - \varrho v \sin \zeta \cos \zeta + \varrho \sin^2 \zeta},$$

$$v + \Delta v = \frac{v - \beta v \operatorname{tg}^2 \zeta + \beta \operatorname{tg} \zeta + \varrho v \cos^2 \zeta - \varrho \sin \zeta \cos \zeta}{1 - \beta v \operatorname{tg} \zeta - \beta \operatorname{tg}^2 \zeta - \varrho v \sin \zeta \cos \zeta + \varrho \sin^2 \zeta}$$

Hierauf wenden wir, um die Nenner zu beseitigen, die Formel an

$$\frac{1}{1 + \varepsilon} = 1 - \varepsilon +$$

Mehr Glieder sind nicht nötig, da β^2 und $\varrho\beta$ entfallen. Es entsteht

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= \varrho u \cos^2 \zeta + \beta u v \operatorname{tg} \zeta + \varrho u v \sin \zeta \cos \zeta, \\ \Delta v &= \varrho v (\cos^2 \zeta - \sin^2 \zeta) + \varrho v^2 \sin \zeta \cos \zeta + \beta v^2 \operatorname{tg} \zeta + \beta \operatorname{tg} \zeta - \varrho \sin \zeta \cos \zeta \end{aligned} \right\} (33)$$

Es erubrigt noch die Umformung von ϱ zu einem Ausdruck, welcher nur ζ , β , β' und die Koordinaten u , v enthält. Nach (30) gilt

$$\varrho \operatorname{tg} z_1 = \operatorname{tg} \zeta_1 - \operatorname{tg} z_1 = \operatorname{tg} (z_1 + \Delta z_1) - \operatorname{tg} z_1 \quad (34)$$

Nun ist aber $\Delta z_1 = b_1 \operatorname{tg} z_1$, also wird mit Vernachlässigung von b_1^2 (b , b_1 , β , β_1 sind von gleicher Größenordnung)

$$\operatorname{tg} (z_1 + \Delta z_1) = \operatorname{tg} z_1 + b_1 \operatorname{tg} z_1 \sec^2 z_1$$

Demnach folgt aus (34)

$$\varrho = b_1 \sec^2 z_1 \quad (35)$$

Zwischen b_1 und β_1 besteht nach (22) die Gleichung

$$b_1 = \frac{\operatorname{tg} \zeta_1}{\operatorname{tg} z_1} \beta_1$$

Da sich ζ_1 und z_1 um Größen von der Ordnung β unterscheiden, so ist

$$b_1 = \beta_1 + \text{Glieder in } \beta^2$$

Wir können also in (35) b_1 ohne weiteres durch β_1 ersetzen, womit sich ergibt

$$\varrho = \beta_1 \sec^2 z_1 \quad (36)$$

Aus (23) folgt nun

$$\beta_1 = \beta_0 + \beta' \operatorname{tg}^2 \zeta_1,$$

$$\beta = \beta_0 + \beta' \operatorname{tg}^2 \zeta$$

Also

$$\beta_1 = \beta + \beta' (\operatorname{tg}^2 \zeta_1 - \operatorname{tg}^2 \zeta) \quad (37)$$

Um auch z_1 zu eliminieren, benutzen wir (26) und erhalten

$$\sec^2 z_1 = 1 + \operatorname{tg}^2 z_1 = 1 + U^2 + V^2$$

Nach (24) entsteht hieraus bei passender Umformung

$$\sec^2 z_1 = \frac{\sec^2 z + u^2 \sec^2 z + v^2 \sec^2 z}{1 + 2v \operatorname{tg} z + v^2 \operatorname{tg}^2 z}$$

Wieder entwickeln wir den Nenner in eine Reihe, müssen jetzt aber bis zu Gliedern 3. Ordnung gehen, um βK^3 mitzuführen. Es ergibt sich

$$\sec^2 z_1 = \sec^2 z [1 - 2v \operatorname{tg} z + u^2 + v^2 (1 + 3 \operatorname{tg}^2 z) - 2u^2 v \operatorname{tg} z - 2v^3 \operatorname{tg} z (1 + 2 \operatorname{tg}^2 z)] \quad (38)$$

Analog gilt für die in (37) auftretende Differenz $\text{tg}^2 \zeta_1 - \text{tg}^2 \zeta$ mit der hier statthafter Vernachlässigung der höheren Glieder

$$\text{tg}^2 \zeta_1 - \text{tg}^2 \zeta = \sec^2 \zeta_1 - \sec^2 \zeta = -2(v + \Delta v) \text{tg} \zeta \sec^2 \zeta$$

Δv enthält in allen Gliedern β oder ϱ , kann folglich in dem Koeffizienten von β' fortfallen, womit (37) übergeht in

$$\beta_1 = \beta - 2\beta'v \text{tg} \zeta \sec^2 \zeta$$

Wenn schließlich dieser Wert zugleich mit (38) in (36) eingesetzt wird, so kann — immer unter den bekannten Vernachlässigungen — überall z durch ζ ersetzt werden, und es folgt

$$\varrho = \beta \sec^2 \zeta [1 - 2v \text{tg} \zeta + u^2 + v^2(1 + 3 \text{tg}^2 \zeta) - 2u^2v \text{tg} \zeta - 2v^3 \text{tg} \zeta (1 + 2 \text{tg}^2 \zeta)] - 2\beta'v \text{tg} \zeta \sec^4 \zeta$$

Mit diesem Ausdruck entstehen nun aus (33) die Gleichungen

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= \beta u + \beta u^3 + \beta u v^2 \sec^2 \zeta, \\ \Delta v &= \beta v \sec^2 \zeta - \beta u^2 \text{tg} \zeta - \beta v^2 \text{tg} \zeta \sec^2 \zeta + \beta u^2 v \sec^2 \zeta \\ &\quad + \beta v^3 \sec^4 \zeta + 2\beta'v \text{tg} \zeta \sec^2 \zeta \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

Als letzter Schritt steht noch die Transformation von $u, v, \Delta u, \Delta v$ in $x, y, \Delta x$ und Δy aus. Das System u, v geht über in x, y durch Drehung um den scheinbaren parallaktischen Winkel k , entsprechend erfordert der Übergang von $u + \Delta u, v + \Delta v$ in $x + \Delta x, y + \Delta y$ eine Drehung um den wahren parallaktischen Winkel χ . Folgende Gleichungen gelten also in aller Strenge

$$\left. \begin{aligned} x + \Delta x &= (u + \Delta u) \cos \chi + (v + \Delta v) \sin \chi, \\ y + \Delta y &= -(u + \Delta u) \sin \chi + (v + \Delta v) \cos \chi, \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= u \cos k + v \sin k, \\ y &= -u \sin k + v \cos k, \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

$$\left. \begin{aligned} u &= x \cos k - v \sin k, \\ v &= x \sin k + y \cos k, \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

$$u^2 + v^2 = x^2 + y^2 \quad (43)$$

Da in die endgültigen Ausdrücke nur die vom wahren Ort des Tangentialpunktes abhängenden Größen eingehen sollen, so muß in den vorstehenden Gleichungen k auf χ zurückgeführt werden. Da β^2 vernachlässigt wird, so gelingt dies durch einfache Differentiation folgender Gleichungen

$$\left. \begin{aligned} \sin \mathcal{D} &= \sin \varphi \cos \zeta - \cos \varphi \sin \zeta \cos A, \\ \cos \mathcal{D} \sin \chi &= \cos \varphi \sin A, \\ \cos \mathcal{D} \cos \chi &= \sin \varphi \sin \zeta + \cos \varphi \cos \zeta \cos A, \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

welche sich aus Abb 7 durch Anwendung der Grundformeln der sphärischen Trigonometrie ergeben. Veränderlich sind ζ, χ und \mathcal{D} . Wir differenzieren zuerst die erste der Gleichungen (44) und erhalten unter Beachtung der dritten

$$d\mathcal{D} = -\cos \chi d\zeta$$

Weiter liefert die Differentiation der zweiten Formel (44)

$$d\chi = \text{tg} \mathcal{D} \text{tg} \chi d\mathcal{D}$$

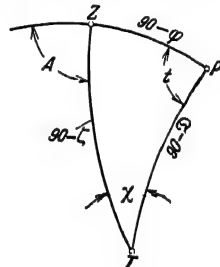


Abb 7 Zur Transformation von $u, v, \Delta u, \Delta v$ in $x, y, \Delta x, \Delta y$. Berechnung der Hilfsgrößen k_1, k_2 (Ziff 16). P = Himmelspol, Z = Zenit, T = wahrer Tangentialpunkt

Durch Elimination von $d\mathfrak{D}$ folgt hieraus

$$d\chi = -\operatorname{tg} \mathfrak{D} \sin \chi d\zeta \quad (45)$$

Verstehen wir jetzt unter $d\chi$, $d\zeta$ die Änderungen von χ bzw ζ beim Übergang vom wahren auf das scheinbare Plattenzentrum, so ist zu setzen

$$\begin{aligned} k &= \chi + d\chi, \\ d\zeta &= -\beta \operatorname{tg} \zeta, \end{aligned}$$

da ja die Zenitdistanz verkleinert wird. Hiermit entsteht aus (45)

$$d\chi = \beta \operatorname{tg} \mathfrak{D} \operatorname{tg} \zeta \sin \chi$$

Dieser Wert liefert nun, in die Gleichungen

$$\begin{aligned} \cos k &= \cos \chi - \sin \chi d\chi, \\ \sin k &= \sin \chi + \cos \chi d\chi \end{aligned}$$

eingesetzt, folgende Beziehungen zwischen χ und k

$$\begin{aligned} \cos k &= \cos \chi - \beta \operatorname{tg} \mathfrak{D} \operatorname{tg} \zeta \sin^2 \chi, \\ \sin k &= \sin \chi + \beta \operatorname{tg} \mathfrak{D} \operatorname{tg} \zeta \sin \chi \cos \chi \end{aligned}$$

Werden diese Ausdrücke in die Formeln (41) eingeführt, so folgt

$$\begin{aligned} x &= u \cos \chi + v \sin \chi + \beta \operatorname{tg} \mathfrak{D} \operatorname{tg} \zeta \sin \chi (-u \sin \chi + v \cos \chi), \\ y &= -u \sin \chi + v \cos \chi - \beta \operatorname{tg} \mathfrak{D} \operatorname{tg} \zeta \sin \chi (u \cos \chi + v \sin \chi) \end{aligned}$$

In den Klammern kann nun — wieder unter Vernachlässigung von β^2 — χ mit k vertauscht werden, wodurch die Klammern in x bzw y übergehen

Die so vereinfachten Ausdrücke für x und y setzen wir in (40) ein und erhalten

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= \Delta u \cos \chi + \Delta v \sin \chi - \beta \operatorname{tg} \mathfrak{D} \operatorname{tg} \zeta \sin \chi y, \\ \Delta y &= -\Delta u \sin \chi + \Delta v \cos \chi + \beta \operatorname{tg} \mathfrak{D} \operatorname{tg} \zeta \sin \chi x \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

Einer Zurückführung von k auf χ bedarf es in den Gleichungen (42) nicht, da diese zur Transformation der in (39) stets mit dem Koeffizienten β auftretenden u , v dienen. Wir können also hier k einfach durch χ ersetzen und erhalten

$$\left. \begin{aligned} u &= x \cos \chi - y \sin \chi, \\ v &= x \sin \chi + y \cos \chi \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

Der Übergang von zenitalen zu polaren Koordinaten vollzieht sich mit Hilfe der Gleichungen (46) und (47), zu denen noch (43) tritt, durch wenige Einstellungen. Um die einfache Gestalt der letztgenannten Formel auszunutzen, schreiben wir (39) in folgender Form

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= \beta u + \beta u(u^2 + v^2) + \beta uv^2 \operatorname{tg}^2 \zeta, \\ \Delta v &= \beta v + \beta v \operatorname{tg}^2 \zeta - \beta \operatorname{tg} \zeta (u^2 + v^2) - \beta v^2 \operatorname{tg}^3 \zeta + \beta \sec^2 \zeta v (u^2 + v^2) \\ &\quad + \beta v^3 \sec^2 \zeta \operatorname{tg}^2 \zeta + 2\beta' v \operatorname{tg}^2 \zeta \sec^2 \zeta \end{aligned} \right\} \quad (39a)$$

Hieraus folgt nach (43) und (47)

$$\begin{aligned} \Delta u &= \beta(x \cos \chi - y \sin \chi) + \beta(x \cos \chi - y \sin \chi)[x^2 + y^2 + (x \sin \chi + y \cos \chi)^2 \operatorname{tg}^2 \zeta], \\ \Delta v &= \beta(x \sin \chi + y \cos \chi) + \beta(x \sin \chi + y \cos \chi) \operatorname{tg}^2 \zeta - \beta(x^2 + y^2) \operatorname{tg} \zeta - \beta(x \sin \chi + y \cos \chi)^2 \operatorname{tg}^3 \zeta \\ &\quad + \beta(x \sin \chi + y \cos \chi)(x^2 + y^2)(1 + \operatorname{tg}^2 \zeta) + \beta(x \sin \chi + y \cos \chi)^3 \operatorname{tg}^2 \zeta (1 + \operatorname{tg}^2 \zeta) \\ &\quad + 2\beta'(x \sin \chi + y \cos \chi) \operatorname{tg}^2 \zeta (1 + \operatorname{tg}^2 \zeta) \end{aligned}$$

Die endgültigen Formeln ergeben sich jetzt durch Einführung dieser Ausdrücke in (46). Wir ordnen sofort nach Potenzen von x und y und erhalten nach passender Umformung

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= \beta[(1 + \operatorname{tg}^2 \zeta \sin^2 \chi)x + \operatorname{tg} \zeta \sin \chi (\operatorname{tg} \zeta \cos \chi - \operatorname{tg} \mathfrak{D})y] \\ &\quad - \beta[\operatorname{tg} \zeta \sin \chi (1 + \operatorname{tg}^2 \zeta \sin^2 \chi)x^2 + 2 \operatorname{tg}^3 \zeta \sin^2 \chi \cos \chi xy + \operatorname{tg} \zeta \sin \chi (1 + \operatorname{tg}^2 \zeta \cos^2 \chi)y^2] \\ &\quad + \beta \left\{ (1 + 2 \operatorname{tg}^2 \zeta \sin^2 \chi + \operatorname{tg}^4 \zeta \sin^4 \chi)x^3 + 3 \operatorname{tg}^2 \zeta \sin \chi \cos \chi (1 + \operatorname{tg}^2 \zeta \sin^2 \chi)x^2 y \right. \\ &\quad \left. + (1 + \operatorname{tg}^2 \zeta + 3 \operatorname{tg}^4 \zeta \sin^2 \chi \cos^2 \chi)xy^2 + \operatorname{tg}^2 \zeta \sin \chi \cos \chi (1 + \operatorname{tg}^2 \zeta \cos^2 \chi)y^3 \right\} \\ &\quad + 2\beta' \sec^2 \zeta \operatorname{tg} \zeta \sin \chi (\operatorname{tg} \zeta \sin \chi x + \operatorname{tg} \zeta \cos \chi y), \\ \Delta y &= \beta[\operatorname{tg} \zeta \sin \chi (\operatorname{tg} \zeta \cos \chi + \operatorname{tg} \mathfrak{D})x + (1 + \operatorname{tg}^2 \zeta \cos^2 \chi)y] \\ &\quad - \beta[\operatorname{tg} \zeta \cos \chi (1 + \operatorname{tg}^2 \zeta \sin^2 \chi)x^2 + 2 \operatorname{tg}^3 \zeta \sin \chi \cos^2 \chi xy + \operatorname{tg} \zeta \cos \chi (1 + \operatorname{tg}^2 \zeta \cos^2 \chi)y^2] \\ &\quad + \beta \left\{ \operatorname{tg}^2 \zeta \sin \chi \cos \chi (1 + \operatorname{tg}^2 \zeta \sin^2 \chi)x^3 + (1 + \operatorname{tg}^2 \zeta + 3 \operatorname{tg}^4 \zeta \sin^2 \chi \cos^2 \chi)x^2 y \right. \\ &\quad \left. + 3 \operatorname{tg}^2 \zeta \sin \chi \cos \chi (1 + \operatorname{tg}^2 \zeta \cos^2 \chi)xy^2 + (1 + 2 \operatorname{tg}^2 \zeta \cos^2 \chi + \operatorname{tg}^4 \zeta \cos^4 \chi)y^3 \right\} \\ &\quad + 2\beta' \sec^2 \zeta \operatorname{tg} \zeta \cos \chi (\operatorname{tg} \zeta \sin \chi x + \operatorname{tg} \zeta \cos \chi y) \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

16 Numerische Berechnung der Refraktion Restrefraktion Um die soeben erhaltenen, recht unübersichtlichen Formeln der Refraktion zur numerischen Rechnung bequemer zu gestalten, empfiehlt ZURHELLEN¹ folgende Hilfsgrößen einzuführen

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \operatorname{tg} \zeta \sin \chi & k_3 &= 1 + k_1^2 \\ k_2 &= \operatorname{tg} \zeta \cos \chi & k_4 &= 1 + k_2^2 \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

Hiermit gehen die Gleichungen (48) über in

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= \beta k_3 x + \beta k_1 (k_2 - \operatorname{tg} \mathfrak{D})y - \beta k_1 k_3 x^2 - 2\beta k_1^2 k_2 xy - \beta k_1 k_4 y^2 \\ &\quad - \beta k_1^3 x^3 + 3\beta k_1 k_2 k_3 x^2 y + \beta (k_3 k_4 + 2k_1^2 k_2^2)xy^2 + \beta k_1 k_2 k_4 y^3 \\ &\quad + 2\beta' (1 + k_1^2 + k_2^2)k_1 (k_1 x + k_2 y), \\ \Delta y &= \beta k_1 (k_2 + \operatorname{tg} \mathfrak{D})x + \beta k_4 y - \beta k_2 k_3 x^2 - 2\beta k_1 k_2^2 xy - \beta k_2 k_4 y^2 \\ &\quad - \beta k_1 k_2 k_3 x^3 - \beta (k_3 k_4 + 2k_1^2 k_2^2)x^2 y + 3\beta k_1 k_2 k_4 xy^2 + \beta k_1^3 y^3 \\ &\quad + 2\beta' (1 + k_1^2 + k_2^2)k_2 (k_1 x + k_2 y) \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

Die Berechnung von k_1 , k_2 usw. geschieht am besten mit Hilfe der schon von BLESSEL² benutzten N und n , definiert durch

$$\begin{aligned} \sin n \cos N &= \sin \varphi, \\ \sin n \sin N &= \cos \varphi \cos t, \\ \cos n &= \cos \varphi \sin t \end{aligned}$$

Hiermit folgen aus den bekannten Formeln (vgl. Abb. 7)

$$\begin{aligned} \sin \zeta \sin \chi &= \cos \varphi \sin t, \\ \sin \zeta \cos \chi &= \sin \varphi \cos \mathfrak{D} - \cos \varphi \sin \mathfrak{D} \cos t, \\ \cos \zeta &= \sin \varphi \sin \mathfrak{D} + \cos \varphi \cos \mathfrak{D} \cos t \end{aligned}$$

für k_1 und k_2 die Werte

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{\cotg n}{\sin(N + \mathfrak{D})}, \\ k_2 &= \cotg(N + \mathfrak{D}) \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

¹ Darlegung u. Kritik usw., S. 23

² Ast. Unters. 1, S. 167 (9) (1841)

Auf den meisten Sternwarten werden sog „parallaktische“ Tafeln vorliegen, welche für die betreffende Polhöhe mit dem Argument t die Werte N und $\log \cotg n$ (für maschinelle Rechnung $\cotg n$ selbst) geben. In diesem Fall ist die Rechnung nach (51) am bequemsten. Wenn aber parallaktische Tafeln nicht vorhanden sind, so eliminiert man n aus (51) mit den Definitionsgleichungen von N und n und rechnet

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} N &= \cotg \varphi \cos t, \\ k_1 &= \frac{\operatorname{tg} t \sin N}{\sin(N + \mathfrak{D})}, \\ k_2 &= \cotg(N + \mathfrak{D}). \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

In beiden Fällen folgt weiter

$$\operatorname{tg} \chi = \frac{k_1}{k_2}, \quad \operatorname{tg} \zeta = \frac{k_1}{\sin \chi} = \frac{k_2}{\cos \chi}$$

Nachdem ζ bekannt ist, entnimmt man β (bzw. $\beta \sin 1'' = \mathfrak{B}$ oder $\beta \sin^2 1'' = \mathfrak{B}$) den Tafeln¹ des Anhangs II (vgl. die Erläuterungen hierzu) unter Berücksichtigung der meteorologischen Daten. Ferner ist zu setzen

$$\beta' = -0'',087$$

Wenn keine Tafeln der photographischen Refraktion zur Verfügung stehen oder ausnahmsweise die Zenitdistanz 70° überschreitet, so bringt man an ζ die mittlere Refraktion an, berechnet mit dem so gefundenen z in üblicher Weise die visuelle Refraktion R_v und findet β aus

$$\beta = 1,0155 \frac{R_v}{\operatorname{tg} \zeta}$$

Sieht man von den quadratischen und kubischen Gliedern ab, so stellen die Refraktionsformeln eine lineare nicht orthogonale Transformation der gemessenen Koordinaten dar. Die in Ziff 12 erwähnte Vereinfachung ist hier also nicht ohne weiteres anwendbar. Wohl aber kann man nach einem Vorschlag von ZURHELLEN² und PINGSDORF³ die linearen Glieder in einen orthogonalen Teil und einen nicht orthogonalen Rest, die sog Restrefraktion, spalten und den ersteren fortlassen. Die Formeln (50) — ohne die quadratischen und kubischen Glieder — lassen sich nämlich auf folgende Form bringen

$$\Delta x = [\beta k_3 + 2\beta'(1 + k_1^2 + k_2^2) k_1^2] x - [\beta k_1(k_2 + \operatorname{tg} \mathfrak{D}) + 2\beta'(1 + k_1^2 + k_2^2) k_1 k_2] y + 2[\beta + 2\beta'(1 + k_1^2 + k_2^2)] k_1 k_2 y,$$

$$\Delta y = [\beta k_1(k_2 + \operatorname{tg} \mathfrak{D}) + 2\beta'(1 + k_1^2 + k_2^2) k_1 k_2] x + [\beta k_3 + 2\beta'(1 + k_1^2 + k_2^2) k_1^2] y + [\beta + 2\beta'(1 + k_1^2 + k_2^2)] (k_2^2 - k_1^2) y$$

Die ersten zwei Glieder in diesen Gleichungen stellen nun eine lineare orthogonale Transformation dar, können also fortfallen. Anzubringen sind nur die beiden letzten Glieder, so daß sich ergibt

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= 2[\beta + 2\beta'(1 + k_1^2 + k_2^2)] k_1 k_2 y, \\ \Delta y &= [\beta + 2\beta'(1 + k_1^2 + k_2^2)] (k_2^2 - k_1^2) y. \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

Diese Formeln der Restrefraktion sind natürlich notigenfalls durch die quadratischen und kubischen Glieder zu ergänzen. Wenn viele an demselben

¹ Weitere Tafeln der photogr. Refraktion sind DE BALL, Refraktionstafeln, Tafel 11 Leipzig 1906, A. KONIG, Photographische Refraktionstafel A N 236, S 81 (1929)

² Der Sternhaufen Messier 46 Veröff. Sternw. Bonn Nr 11, S 23 (1909)

³ Der Sternhaufen in der Cassiopeia Messier 52 Inaug.-Dissert. Bonn 1909, S 27

Beobachtungsort aufgenommene Platten zu reduzieren sind, lohnt es sich, für die betreffende Polhöhe Spezialtafeln anzulegen, welche mit den Argumenten Deklination und Stundenwinkel sofort die vollständigen Koeffizienten der Restrefraktion, evtl. auch der höheren Glieder liefern, so daß die jedesmalige Berechnung der verschiedenen Hilfsgrößen erspart wird¹. Die meteorologischen Daten werden in diesem Falle in gleicher Weise wie auch sonst mit den Tafeln 12—16 des Anhangs II (bei logarithmischer Rechnung mit den Tafeln 9, 10 und 11) berücksichtigt.

Schließlich muß noch entschieden werden, für welchen Moment der Exposition die Refraktionsrechnung durchzuführen ist. Die bequeme Näherung, hierfür die Mitte zu wählen, genügt nur bei kürzerer Aufnahmedauer. Ausführlich ist diese Frage von SCHEINER² und ZURHELLEN³ behandelt worden. Der letztere kommt zu dem Ergebnis, daß man am besten die Konstanten für Anfang, Mitte und Ende der Aufnahme rechnet und zu einem Mittel vereinigt, wobei die Mitte das doppelte Gewicht erhält.

Um für die praktische Durchführung der Rechnung rasch festzustellen, welche Glieder berücksichtigt werden müssen und welche entfallen können, ist es zweckmäßig, auf die für zenitale Koordinaten gültigen Gleichungen (39) zurückzugreifen. Dies ist hier offensichtlich statthaft, denn wenn die Glieder einer bestimmten Ordnung (abgesehen von den linearen mit β , die stets in irgend-einer Form zu berücksichtigen sind) weder in u noch in v merklich sind, so können sie es auch nicht durch die Transformation in x und y werden. In den folgenden Tabellen, in denen K ganz allgemein eine Koordinate auf der Platte bedeutet,

Ordnung βK^2 Stärkstes Glied $\beta \lg \zeta \sec^2 \zeta K^2$					
$\zeta \backslash K$	1°	2°	3°	4°	5°
0°	0',00	0',00	0',00	0',00	0',00
5	0,00	0,01	0,01	0,02	0,04
10	0,00	0,01	0,03	0,05	0,08
15	0,01	0,02	0,05	0,08	0,13
20	0,01	0,03	0,07	0,12	0,18
25	0,01	0,04	0,09	0,16	0,25
30	0,01	0,05	0,12	0,22	0,34
35	0,02	0,07	0,17	0,30	0,46
40	0,03	0,10	0,23	0,41	0,63
45	0,04	0,14	0,32	0,57	0,89
50	0,05	0,20	0,46	0,82	1,28
55	0,08	0,29	0,69	1,23	1,92
60	0,12	0,49	1,10	1,96	3,06
65	0,21	0,85	1,91	3,39	5,30
70	0,41	1,65	3,72	6,60	10,32

Ordnung βK^3 Stärkstes Glied $\beta \sec^4 \zeta K^3$					
$\zeta \backslash K$	1°	2°	3°	4°	5°
0°	0',00	0',00	0',01	0',02	0',04
5	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04
10	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04
15	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04
20	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05
25	0,00	0,00	0,01	0,03	0,06
30	0,00	0,00	0,01	0,04	0,07
35	0,00	0,01	0,02	0,04	0,08
40	0,00	0,01	0,02	0,06	0,11
45	0,00	0,01	0,03	0,08	0,16
50	0,00	0,01	0,05	0,12	0,23
55	0,00	0,03	0,09	0,20	0,40
60	0,00	0,04	0,13	0,32	0,62
65	0,01	0,08	0,26	0,62	1,21
70	0,02	0,18	0,61	1,44	2,80

sind gemäß (39) die Beträge des stärksten Gliedes einer jeden Ordnung für verschiedene Werte von K und ζ angegeben.

Bei einem Plattenfeld von $4^\circ \times 4^\circ$ wäre z. B. $K_{\max} \approx 3^\circ$ (halbe Diagonale) zu setzen. Damit folgt für $\zeta = 45^\circ$ aus der ersten Tabelle $0',32$ als Maximalbetrag des stärksten Gliedes mit βK^2 ,

Ordnung $\beta' K$ Stärkstes Glied $2\beta' \lg^2 \zeta \sec^2 \zeta K$					
$\zeta \backslash K$	1°	2°	3°	4°	5°
45°	0',01	0',01	0',02	0',02	0',03
50	0,01	0,02	0,03	0,03	0,05
55	0,02	0,04	0,06	0,08	0,09
60	0,04	0,07	0,11	0,15	0,18
65	0,08	0,16	0,23	0,31	0,39
70	0,20	0,39	0,59	0,78	0,98

¹ Tafeln der Restrefraktion für die Bonner Sternwarte sind von KÜSNER gerechnet und publiziert worden in Veroff Univ-Sternw Bonn Nr 14 (1920), Anhang.

² Photographie der Gestirne, S 127 (1897) ³ Veroff Sternw Bonn Nr 11, S 24 (1909)

während sich für das kubische Glied $0'',03$ und für das lineare Glied mit β' nur $0'',02$ findet. Können nun alle Korrekturen $< 0'',05$ vernachlässigt werden, so wäre in diesem Fall in den Gleichungen (53) $\beta' = 0$ zu setzen, andererseits müßten aber von den höheren Gliedern der Formeln (50) die quadratischen hinzugefügt werden. Ob von diesen Gliedern noch einige als unbedeutend zu vernachlässigen sind, muß die Berechnung der einzelnen Koeffizienten lehren.

17. Aberration Bezeichnet h_1 den scheinbaren Abstand eines Sterns vom Apex der Erdbewegung und $\mathfrak{f} = 20'',47$ die Aberrationskonstante, so ist der wahre Apexabstand gegeben durch

$$\theta_1 = h_1 + \mathfrak{f} \sin h_1$$

Die Aberration befolgt also ein Gesetz, welches dem der Refraktion sehr ähnlich ist. Daher lassen sich die Entwicklungen der Ziff 15 in weitem Umfange auf die Aberration übertragen, wenn an die Stelle des Zenits jetzt der Apex tritt und entsprechend unter u, v, U, V usw. die nach dem Apex orientierten bzw. auf diesen Ursprung bezogenen Koordinaten verstanden werden. Es sind ferner zu ersetzen

ζ durch θ (= Apexabstand des wahren Tangentialpunkts)	$\beta \operatorname{tg} \zeta$ durch $\mathfrak{f} \sin \theta$
ζ_1 „ θ_1 (= „ „ „ Sterns)	β „ $\mathfrak{f} \cos \theta$
z „ h (= „ „ „ scheinbaren Tangentialpunkts)	$b_1 \operatorname{tg} z_1$ „ $\mathfrak{f} \sin h_1$
z_1 „ h_1 (= „ „ „ Sterns)	b_1 „ $\mathfrak{f} \cos h_1$

Da \mathfrak{f} nur etwa ein Drittel von β beträgt und außerdem das Aberrationsgesetz den Sinus an Stelle der bei der Refraktion auftretenden Tangente enthält, so sind die Glieder der Aberrationsformeln bedeutend kleiner als die entsprechenden der Refraktion. Es sollen daher in den folgenden Entwicklungen die dritten Potenzen der Koordinaten vernachlässigt werden. Glieder, welche denen mit β' bei der Refraktion entsprechen, treten offenbar nicht auf, da \mathfrak{f} konstant ist.

Wenn wir endlich in Analogie zu (30) eine Größe σ definieren durch

$$\sigma = \frac{\operatorname{tg} \theta_1 - \operatorname{tg} h_1}{\operatorname{tg} h_1},$$

so gehen die Formeln (33) und (35) über in

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= \sigma u \cos^2 \theta + \mathfrak{f} u v \sin \theta + \sigma u v \sin \theta \cos \theta, \\ \Delta v &= \sigma v (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + \mathfrak{f} v^2 \sin \theta + \sigma v^2 \sin \theta \cos \theta + \mathfrak{f} \sin \theta - \sigma \sin \theta \cos \theta, \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

$$\sigma = \mathfrak{f} \sec h_1 \quad (55)$$

h_1 muß nun auf θ zurückgeführt werden. Hierzu benutzen wir die Gleichung (38), diese lautet nach den obigen Umbenennungen und Vereinfachungen, wenn gleich die Wurzel gezogen wird

$$\sec h_1 = \sec h \sqrt{1 - 2v \operatorname{tg} h + u^2 + v^2(1 + 3 \operatorname{tg}^2 h)}$$

Durch Entwicklung der Wurzel in die binomische Reihe entsteht hieraus

$$\sec h_1 = \sec h [1 - v \operatorname{tg} h + \frac{1}{2} u^2 + \frac{1}{2} v^2 (1 + 2 \operatorname{tg}^2 h)]$$

Diesen Ausdruck setzen wir in (55) ein, wobei es unter Vernachlässigung von \mathfrak{f}^2 gestattet ist, θ an Stelle von h zu schreiben. Es ergibt sich

$$\sigma = \mathfrak{f} \sec \theta [1 - v \operatorname{tg} \theta + \frac{1}{2} u^2 + \frac{1}{2} v^2 (1 + 2 \operatorname{tg}^2 \theta)]$$

Hiermit folgt aus (54)

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= \mathfrak{f} u \cos \theta + \mathfrak{f} u v \sin \theta, \\ \Delta v &= \mathfrak{f} v \cos \theta - \frac{1}{2} \mathfrak{f} (u^2 - v^2) \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (56)$$

Auch für den jetzt noch ausstehenden Übergang zu polaren Koordinaten können die zu demselben Zweck bei der Refraktion aufgestellten Formeln (46) und (47) benutzt werden, in welchen außer den schon erwähnten Änderungen noch statt χ der Winkel π am Tangentialpunkt in dem sphärischen Dreieck Pol—Apex—wahrer Tangentialpunkt einzuführen ist. Die Gleichungen lauten dann

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= \Delta u \cos \pi + \Delta v \sin \pi - \mathfrak{k} \operatorname{tg} \mathfrak{D} \sin \theta \sin \pi y, \\ \Delta y &= -\Delta u \sin \pi + \Delta v \cos \pi + \mathfrak{k} \operatorname{tg} \mathfrak{D} \sin \theta \sin \pi x, \end{aligned} \right\} \quad (57)$$

$$\left. \begin{aligned} u &= x \cos \pi - y \sin \pi, \\ v &= x \sin \pi + y \cos \pi \end{aligned} \right\} \quad (58)$$

Wir setzen wie bei der Refraktion zuerst (58) in (56), darauf die so erhaltenen Werte für Δu und Δv in (57) ein und erhalten folgende Formeln

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= \mathfrak{k} \cos \theta x - \mathfrak{k} \sin \theta \sin \pi \operatorname{tg} \mathfrak{D} y + \mathfrak{k} \sin \theta \cos \pi x y + \frac{1}{2} \mathfrak{k} \sin \theta \sin \pi (x^2 - y^2), \\ \Delta y &= \mathfrak{k} \sin \theta \sin \pi \operatorname{tg} \mathfrak{D} x + \mathfrak{k} \cos \theta y + \mathfrak{k} \sin \theta \sin \pi x y - \frac{1}{2} \mathfrak{k} \sin \theta \cos \pi (x^2 - y^2) \end{aligned} \right\} \quad (59)$$

Wie man sieht, sind die linearen Glieder „orthogonal“, brauchen also im allgemeinen nicht angebracht zu werden. Auch die quadratischen Glieder werden selten gebraucht, wie das nebenstehende Tafelchen zeigt, das für verschiedene Maximalbeträge K der Koordinaten die zugehörigen größtmöglichen Werte l der quadratischen Aberrationsglieder gibt. Die numerische Auswertung der Gleichungen (59) ist also nur bei großen Plattenfeldern notwendig. In solchen Fällen setzt man

K	l
1°	0,006
2	0,025
3	0,056
4	0,100
5	0,156

$$\left. \begin{aligned} Q &= \mathfrak{k} \cos \theta, \\ R &= \mathfrak{k} \sin \theta \sin \pi, \\ S &= \mathfrak{k} \sin \theta \cos \pi \end{aligned} \right\}$$

und erhält

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= Qx - R \operatorname{tg} \mathfrak{D} y + Sxy + \frac{1}{2} R (x^2 - y^2), \\ \Delta y &= R \operatorname{tg} \mathfrak{D} x + Qy + Rxy - \frac{1}{2} S (x^2 - y^2) \end{aligned} \right\} \quad (60)$$

Die Konstanten Q , R und S ergeben sich am bequemsten mit Hilfe der in den Ephemeriden angegebenen Größen H , h und i aus den Formeln

$$\left. \begin{aligned} Q &= -h \cos (H + \mathfrak{N}) \cos \mathfrak{D} + i \sin \mathfrak{D}, \\ R &= h \sin (H + \mathfrak{N}), \\ S &= h \cos (H + \mathfrak{N}) \sin \mathfrak{D} + i \cos \mathfrak{D}, \end{aligned} \right\} \quad (61)$$

welche sich leicht durch Betrachtung der sphärischen Dreiecke Himmelspol—Apex—Tangentialpunkt und Himmelspol—Pol der Ekliptik—Apex verifizieren lassen¹.

18 Prazession und Nutation. Da die relative Lage der Gestirne durch Prazession und Nutation nicht verändert wird, so ist a priori klar, daß deren Einfluß auf tangentielle Koordinaten nur in einer Drehung des Koordinatensystems in Positionswinkel um den Tangentialpunkt bestehen kann. Die Formeln müssen also in aller Strenge orthogonal sein. Ist nun ΔP der Betrag der Prazession und Nutation in Positionswinkel, so gilt

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= x \cos \Delta P + y \sin \Delta P, \\ \Delta y &= -x \sin \Delta P + y \cos \Delta P \end{aligned} \right\} \quad (62)$$

¹ Siehe ZURHELLEN, Darlegung und Kritik usw., S. 54 (1904).

Zur numerischen Rechnung nach diesen selten benötigten Formeln spaltet man ΔP in die beiden Teile

ΔP_1 = Reduktion der Positionswinkel der Sterne in bezug auf den Tangentialpunkt vom wahren Aquinoktium T zur Zeit der Aufnahme auf das mittlere des Jahresanfangs T_0

ΔP_2 = Reduktion der Positionswinkel vom mittleren Aquinoktium T_0 auf das Aquinoktium T_1 ¹

ΔP_1 und ΔP_2 sind für alle Sterne einer Platte konstant. Man berechnet sie unter Entnahme von G , g und n aus den Ephemeridensammlungen nach den bekannten Formeln

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_1 &= -g \sin(G + \mathfrak{U}) \sec \mathfrak{D}, \\ \Delta P_2 &= n \sin \mathfrak{U} \sec \mathfrak{D} (T_1 - T_0), \\ \Delta P &= \Delta P_1 + \Delta P_2 \end{aligned} \right\} \quad (63)$$

e) Anschluß an die Anhaltsterne

19 Vorbereitungen Zwischen den Tangentialkoordinaten X , Y und den gemessenen, soweit erforderlich wegen der „sphärischen“ Fehler (evtl. auch wegen Plattenneigung) verbesserten Koordinaten ξ , η bestehen nach Ziff 12 die Gleichungen (18), in welchen zu setzen ist $\Delta x = X - \xi$, $\Delta y = Y - \eta$. Da sich die ξ , η von den unverbesserten Koordinaten x , y nur wenig unterscheiden, so kann man auf den rechten Seiten x , y statt ξ , η einsetzen, zumal die Koeffizienten A und B als klein vorausgesetzt waren (vgl. Ziff 12, vorletzter Absatz). Die Formeln (18) lauten also

$$\left. \begin{aligned} X - \xi &= A x + B y + C, \\ Y - \eta &= -B x + A y + D \end{aligned} \right\} \quad (64)$$

Zur Bestimmung der „Plattenkonstanten“ A , B , C und D dienen die Anhaltsterne, deren Tangentialkoordinaten aus den bekannten $A R$ und $Dekl$ nach den Formeln der Ziff 10 zu berechnen sind. Hierfür müssen zunächst \mathfrak{U} und \mathfrak{D} , die $A R$ und $Dekl$ des rechnerischen Tangentialpunktes, ermittelt werden. Eine Genauigkeit von $1''$ bis $2''$ genügt hierbei selbst in ungünstigen Fällen (vgl. Ziff 13) und kann leicht dadurch erreicht werden, daß man einer Verfälschung durch den Einfluß der noch unbekannten A und B vorbeugend, \mathfrak{U} und \mathfrak{D} zwischen den gemessenen Koordinaten solcher Paare von Anhaltsternen interpoliert, welche in der Nähe des Tangentialpunktes und annähernd mit ihm in einer Geraden liegen. Ein anderes Verfahren besteht darin, eine Gruppe von Anhaltsternen in der Umgebung des Tangentialpunktes so auszuwählen, daß ihr Schwerpunkt möglichst mit dem Tangentialpunkt zusammenfällt. Man bildet nun die arithmetischen Mittel der x und y dieser Sterne, verwandelt sie angenähert in $\Delta \alpha$ und $\Delta \delta$, und zieht diese kleinen Beträge von den Mitteln der $A R$ und $Dekl$ ab. Ein in nächster Nähe des Tangentialpunktes liegender Anhaltstern kann natürlich ebenso behandelt werden wie der Schwerpunkt einer Gruppe, so daß sich in diesem Falle jede Interpolation oder Mittelbildung erubrigt. Die endgültigen Werte von C und D , welche aus der in folgender Ziffer beschriebenen Ausgleichung hervorgehen, liefern eine Kontrolle, ob die Abweichung des rechnerischen Tangentialpunktes von dem auf der Platte angenommenen die zulässigen Grenzen nicht überschritten hat.

¹ Eine Tafel der Präzession in P W enthält C WIRTZ, Tafeln und Formeln aus Astronomie und Geodäsie, Tafel 38b (1918)

Damit die Anhaltsternörter nicht durch Eigenbewegungen verfälscht werden, darf die Epoche der Beobachtungen, aus denen die Örter abgeleitet sind, nicht zu weit von dem Zeitpunkt der Aufnahme entfernt liegen, oder es müssen die Eigenbewegungen rechnerisch berücksichtigt werden, was natürlich nur möglich ist, wenn genügend sichere Werte hierfür vorliegen. Die Wahl des Äquinoktiums ist jedoch willkürlich, die Örter der neu zu bestimmenden Sterne ergeben sich in demselben Äquinoktium, auf das die Anhaltsternörter reduziert sind. Präzession braucht nur dann angebracht zu werden, wenn die neu zu bestimmenden Sterne auf ein anderes Äquinoktium als das der Anhaltsterne gestellt werden sollen. In diesem Falle sind die Tangentialkoordinaten nach (62) zu korrigieren, ferner ist zur Verwandlung in A, R und $Dekl$ der in üblicher Weise auf das betreffende Äquinoktium übertragene Ort des Tangentialpunktes zu benutzen.

Zu erwähnen ist noch folgender indirekter Einfluß der Präzession. In der oben beschriebenen Weise ergeben sich \mathfrak{A} und \mathfrak{D} für das Äquinoktium der Anhaltsterne. Auf dasselbe Äquinoktium sind folglich alle hieraus berechneten Konstanten der Refraktions- und Aberrationsformeln (ζ, χ, Q, R usw.) bezogen, welche streng genommen für die Zeit der Aufnahme zu rechnen sind. Ein merklicher Fehler kann hierdurch nur bei langen Zwischenzeiten entstehen, er ist natürlich leicht zu vermeiden, indem man \mathfrak{A} und \mathfrak{D} für die Berechnung der Konstanten genähert auf das Jahr der Aufnahme überträgt.

Daß endlich alle gemessenen Koordinaten näherungsweise in derselben Einheit wie die X, Y der Anhaltsterne auszudrücken und dementsprechend auch die Formeln zur Verbesserung der x, y (wegen Refraktion usw.) umzustellen sind, bedarf kaum des Hinweises.

20 Ausgleichung. Wir nehmen jetzt an, daß die Tangentialkoordinaten der Anhaltsterne, bezogen auf den bekannten Tangentialpunkt $\mathfrak{A}, \mathfrak{D}$ vorliegen. Dann liefert jeder Anhaltstern ein Paar Bestimmungsgleichungen für A, B, C und D von der Form (64). Daß die theoretische Mindestzahl von zwei Anhaltsternen für die Bestimmung der vier Unbekannten in praxi nicht hinreicht, ist selbstverständlich. Wie viele Anhaltsterne im Einzelfall notwendig sind, hängt von vielerlei Umständen ab (α Größe der Platte, Genauigkeit der Örter sowie der gemessenen Koordinaten, Verteilung der Sterne über die Platte u. a. m.) und läßt sich daher nicht in eine allgemeine Regel fassen.

Die Unbekannten sind also stets durch Ausgleichung zu ermitteln. Infolge der speziellen Gestalt der Bedingungsgleichungen vereinfacht sich die Rechnung gegenüber dem Normalfall bedeutend. In der üblichen Schreibweise lauten die Normalgleichungen¹

$$\begin{aligned} [aa]A &+ [ac]C + [ad]D = [an] \\ &+ [aa]B + [ad]C - [ac]D = [bn] \\ [ac]A + [ad]B + [cc]C &= [cn] \\ [ad]A - [ac]B &+ [cc]D = [dn] \end{aligned}$$

Ist m die Zahl der Anhaltsterne und $\Delta x = X - \xi, \Delta y = Y - \eta$, so sind die Koeffizienten obiger Gleichungen gegeben durch

$$\begin{array}{l|l} [aa] = [xx] + [yy] & [an] = [x\Delta x] + [y\Delta y] \\ [ac] = [x] & [bn] = [y\Delta x] - [x\Delta y] \\ [ad] = [y] & [cn] = [\Delta x] \\ [cc] = m & [dn] = [\Delta y] \end{array}$$

$$[nn] = [\Delta x \Delta x] + [\Delta y \Delta y]$$

¹ KÜSTNER, Veröff Univ-Sternw Bonn Nr 14, Anhang (1920)

Für die Auflösung der Normalgleichungen sind nur folgende sechs Größen zu bilden

$$\begin{aligned} [cc1] &= [cc] - \frac{[ab]}{[aa]}[ac] & [cn1] &= [cn] - \frac{[ac]}{[aa]}[an] \\ [cc2] &= [cc1] - \frac{[ad]}{[aa]}[ad] & [cn2] &= [cn1] - \frac{[ad]}{[aa]}[bn] \\ [dn1] &= [dn] - \frac{[ad]}{[aa]}[an] \\ [dn2] &= [dn1] + \frac{[ac]}{[aa]}[bn] \end{aligned}$$

Hieraus ergeben sich die Unbekannten, wie folgt

$$\begin{aligned} C &= \frac{[cn2]}{[cc2]} \\ D &= \frac{[dn2]}{[cc2]} \end{aligned} \left\{ \text{mit dem Gewicht } p_2 = [cc2] \right.$$

$$\begin{aligned} A &= \frac{[an]}{[aa]} - \frac{[ac]}{[aa]}C - \frac{[ad]}{[aa]}D \\ B &= \frac{[bn]}{[aa]} - \frac{[ad]}{[aa]}C + \frac{[ac]}{[aa]}D \end{aligned} \left\{ \text{mit dem Gewicht } p_1 = [aa] \frac{[cc2]}{[cc]} \right.$$

Die übrigbleibenden Fehler finden sich dann aus den Gleichungen

$$\begin{aligned} v_x &= Ax + By + C - \Delta x, \\ v_y &= -Bx + Ay + D - \Delta y, \end{aligned}$$

wobei die Vorzeichen so definiert sind, daß v_x und v_y sofort die aus der Platte folgenden Verbesserungen der Anhaltsternörter darstellen. Rechnet man noch

$$[nn4] = [nn] - \left\{ \frac{[an]}{[aa]}[an] + \frac{[bn]}{[aa]}[bn] + C[cc2] + D[dn2] \right\},$$

so erhält man folgende Kontrollen

$$\begin{aligned} [v_x v_x] + [v_y v_y] &= [nn4], \\ [v_x] &= [v_y] = 0 \end{aligned}$$

Schließlich ergeben sich die m F der Δx , Δy sowie der Unbekannten aus

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{[nn4]}{2m-4}},$$

$$\varepsilon_A = \varepsilon_B = \frac{\varepsilon}{\sqrt{p_1}}, \quad \varepsilon_C = \varepsilon_D = \frac{\varepsilon}{\sqrt{p_2}}$$

Die vorstehenden Formeln gelten für den Fall, daß allen Bedingungsgleichungen dasselbe Gewicht erteilt ist und sind entsprechend zu modifizieren, wenn besondere Gründe dazu veranlassen sollten, eine andere Gewichtsverteilung vorzunehmen.

Es ist selbstverständlich ebensogut möglich, die $2m$ Bedingungsgleichungen nicht als ein einziges System mit vier Unbekannten zu behandeln, sondern in zwei Systeme zu je drei Unbekannten zu teilen. Man erhält dann für A und B je zwei Werte, welche den Gewichten entsprechend zu mitteln sind. Dieses Verfahren der Ausgleichung ist zwar keineswegs einfacher als das zuerst beschriebene,

es liefert aber eine Kontrolle dafür, ob Skalenwert und Orientierung in beiden Koordinaten tatsächlich innerhalb der zulässigen Unsicherheit gleich sind¹

Der weitere Gang der Rechnung ist folgender. Man bringt die in Frage kommenden Korrekturen (Restrefraktion, höhere Glieder der Refraktion und Aberration) zunächst nur an die gemessenen Koordinaten der Anhaltsterne an. Hierauf wird die Ausgleichung durchgeführt, womit die Koeffizienten in (64) bekannt sind. Diese Gleichungen vereinfacht man mit den Refraktions- und Aberrationsformeln zu einem neuen Gleichungspaar, welches folgende Gestalt hat

$$\left. \begin{aligned} X - x &= a x + b y + c \\ Y - y &= a' x + b' y + c' \end{aligned} \right\} + \text{Glieder höherer Ordnung} \quad (65)$$

Die gemessenen Koordinaten der neu zu bestimmenden Sterne können also unter Übergehung der ξ, η sofort in X, Y , bezogen auf den bekannten Tangentialpunkt $\mathfrak{N}, \mathfrak{D}$, transformiert werden. Jetzt steht nur noch die Verwandlung in α, δ aus, welche nach den in Ziff 10 abgeleiteten Formeln geschieht. Für die Anhaltsterne ergeben sich die aus der Platte folgenden Orte unmittelbar aus den bekannten $A R$ und $Dekl$, indem man an diese die Verbesserungen $v_x \sec \mathfrak{D}$ bzw. v_y anbringt. Dies Verfahren ist zwar nicht ganz streng, genügt aber praktisch in der weitaus größten Mehrzahl der Fälle, da die v_x und v_y stets klein sind. Der begangene Fehler kann leicht mit den Formeln (17) in Ziff 10 abgeschätzt werden. Man erreicht übrigens, wie diese Formeln zeigen, eine durchschnittlich etwas bessere Näherung in $A R$, wenn $v_x \sec \delta$ statt $v_x \sec \mathfrak{D}$ gesetzt wird.

Zu erwähnen ist noch eine von ZURHELLEN² angegebene Methode, welche einen direkten Übergang von den gemessenen Koordinaten auf $A R$ und $Dekl$ liefert und in mäßigen Deklinationen dann Vorteile bietet, wenn die zu bestimmenden Orte zahlreich sind und sich auf ein enges Gebiet in der Umgebung des Tangentialpunktes zusammendrängen. Bei diesem Verfahren sind zunächst die gemessenen Koordinaten einer Reihe von aquidistant über die Platte verteilten Punkten (z. B. der Quadratmitteln bei Gitterplatten) in der normalen Weise in α, δ umzurechnen. Dann werden die Koordinatendifferenzen dx, dy gegen den nachstliegenden Punkt für die einzelnen Sterne gebildet. Wendet man nun die Gleichungen (65) auf die relativ kleinen dx, dy an, so können außer c und c' auch die höheren Glieder fortfallen. Es gilt also

$$\begin{aligned} dX &= dx + a dx + b dy, \\ dY &= dy + a' dx + b' dy \end{aligned}$$

Werden diese Werte in die Formeln (17) eingesetzt, so entsteht ein Gleichungspaar, welches dx und dy sofort in $A R$ - und $Dekl$ -Differenzen gegen die vorher ermittelten Orte der Bezugspunkte verwandelt. Die Rechnung nach dem ZURHELLEN'schen Verfahren ist nur dann bequem, wenn in (17) die Glieder $(Y^2 dX + 2XY dY) \sec^2 \mathfrak{D} \tan^2 \mathfrak{D}$ und $\frac{1}{2}(X^2 dY + 2XY dX) \sec^2 \mathfrak{D}$ vernachlässigt werden dürfen. Ist dies aber der Fall, so läßt sich die numerische Auswertung durch geeignete Hilfstafeln sehr vereinfachen.

Die Anwendung des Ansatzes (64), der im folgenden kurz der orthogonale Ansatz genannt werden soll, setzt voraus, daß sowohl das System der gemessenen Koordinaten, wie auch das der Tangentialkoordinaten der Anhaltsterne rechtwinklig ist und daß für x und y (bzw. X und Y) dieselbe Maßeinheit gilt. Bei Anhaltsternorten, die an modernen Meridiankreisen bestimmt sind, wird man

¹ Andere Auflösungsverfahren siehe ABETTI, Mem Soc Spett. Italiani 33, S 235 (1904), HRABÁK, R. A. J. 1, II 1, S 103

² Darlegung und Kritik usw., S 94 (1904), Veröff. Univ.-Sternw. Bonn Nr. 11, S 32 (1909)

diese Voraussetzung wohl stets machen dürfen. Auch wenn sie nicht erfüllt, das System der X, Y also irgendwie verzerrt wäre, so würde dieser Umstand allein einen anderen, z. B. den gleich zu besprechenden Ansatz noch nicht rechtfertigen. Denn es wurde sich dann die Verzerrung in vollem Maße auf die zu bestimmenden Örter fortpflanzen, während der orthogonale Ansatz die Aussicht auf eine wenigstens teilweise Elimination der systematischen Fehler bietet. Bei dem System der gemessenen Koordinaten liegen die Verhältnisse jedoch anders. Hier erheischt die obengenannte Forderung besondere Maßregeln bei der Messung, welche stets lastig, bei Massenarbeiten in praxi oft gar nicht durchzuführen sind. Ferner kann, wie von KONIG und HECKMANN¹ nachgewiesen wurde, ein Unterschied der Maßeinheiten beider Koordinaten durch Abbildungsfehler des Objektivs vertauscht werden. In allen solchen Fällen darf man den orthogonalen Ansatz nicht anwenden, sondern muß von folgenden Bedingungsgleichungen ausgehen:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= A x + B y + C, \\ \Delta y &= -B' x + A' y + C' \end{aligned} \right\} \quad (66)$$

Die Ausgleichung ist also in derselben Weise durchzuführen wie bei getrennter Behandlung der Koordinaten nach dem orthogonalen Ansatz, natürlich dürfen jetzt die Werte A und A' sowie B und B' nicht gemittelt werden. Es ist ferner klar, daß bei der Ausgleichung nach (66) sämtliche linearen Korrekturen (nicht nur die orthogonalen) unberücksichtigt bleiben können. Die Ersparnis an Rechenarbeit ist übrigens unbedeutend, weil es sich nur um die Anhaltsterne handelt, der weitere Rechnungsgang aber der gleiche bleibt wie bei dem orthogonalen Ansatz. Da zudem für die Skalen- und Orientierungskoeffizienten hier nur etwa halb so große Gewichte erhalten werden wie dort, so ist der orthogonale Ansatz, wenn seine Anwendung statthaft ist, unbedingt vorzuziehen.

Es liegt nahe, noch einen Schritt weitergehend auch die quadratischen Glieder mit in die Ausgleichung aufzunehmen, so daß von allen Korrekturen nur die kubischen Refraktionsglieder übrigbleiben. Man wird dann zu folgendem Paar von Bedingungsgleichungen geführt:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= A x + B y + C + D x^2 + E xy + F y^2, \\ \Delta y &= A' x + B' y + C' + D' x^2 + E' xy + F' y^2 \end{aligned} \right\} \quad (67)$$

Das soeben über die Gewichtsverminderung bei dem Ansatz (66) Gesagte gilt hier natürlich in erhöhtem Maße, d. h. zur Ausgleichung nach vorstehenden Gleichungen ist eine große Zahl gut bestimmter Anhaltsterne erforderlich. Bei sehr ausgedehnten Plattenfeldern, wo einerseits eine hinreichend genaue Bestimmung der Lage des Tangentialpunktes schwierig oder unmöglich ist (vgl. Ziff 13), andererseits die Anhaltsterne im allgemeinen zahlreicher sein werden, kann es jedoch geboten sein, in die Ausgleichung quadratische Glieder einzuführen, wenn auch nicht immer in der oben angenommenen theoretischen Höchstzahl und Allgemeinheit². Daß hinsichtlich des weiteren Rechnungsganges das oben bei den anderen Ansätzen Gesagte hier in sinnvoller Übertragung gilt, braucht kaum erwähnt zu werden.

21. Ableitung von Instrumentalfehlern aus den Ausgleichungsresten. Soweit es sich um eine einzelne oder um einige wenige Platten handelt, kommen hier in Betracht die Koeffizienten p und q der Plattenneigung sowie die Verzerrung des Objektivs.

¹ V J S 63, S 291 u 302 (1928)

² Vgl. SCHLESINGER u. BARNEY, Yale Obs Transactions 9, S (9) (1933)

Eine Bestimmung der letzteren hat nur Sinn, wenn es sich um einen starken Betrag handelt, auch dann ist eine sehr große Zahl von Anhaltsternen erforderlich, und zwar aus folgendem Grunde. Die Verzeichnung wird bereits durch die Maßstabskoeffizienten der Ansätze (64) oder (66) zum größten Teil berücksichtigt¹. Ist sie nun klein, so verschwindet ihr Einfluß in den v_x und v_y , die Ableitung eines genauen Wertes der Verzeichnung aus den Resten ist daher unmöglich und auch nicht nötig. Es wird also meistens die Streckenverschiebung² vorzuziehen sein, wenn sich die Bestimmung der Verzeichnung überhaupt als notwendig erweisen sollte.

Was die Plattenneigung anlangt, so findet hier eine gegenseitige Beeinflussung zwischen den aus der ersten Ausgleichung bestimmten und den neu einzuführenden Unbekannten in dem obigen Sinne nicht statt, so daß sich bei einigermaßen beträchtlicher Zahl der Anhaltsterne hinreichend verbürgte Werte für p und q ergeben. Es ändern sich lediglich die Nullpunktskonstanten C und D (bzw. C und C'), weshalb entsprechende Verbesserungen hierfür anzusetzen sind³. Gemäß den Formeln (20) hat also der Ansatz zu lauten

$$\left. \begin{aligned} v_x &= px^2 + qxy + c, \\ v_y &= pxy + qy^2 + d \end{aligned} \right\} \quad (68)$$

Wenn eine hinreichende Zahl von gleichförmig über das Plattenfeld verteilten Anhaltsternen zur Verfügung steht, kann dieser Ansatz noch vereinfacht werden, indem man die Bedingungsgleichungen in passenden Gruppen zu „Normalorten“ zusammenfaßt. Dadurch verschwinden die Glieder mit xy gegenüber den anderen, so daß an Stelle von (68) die rechnerisch viel bequemeren Gleichungen

$$\left. \begin{aligned} v_x &= px^2 + c, \\ v_y &= qy^2 + d \end{aligned} \right\} \quad (69)$$

treten können.

Vorstehendes Verfahren ist selbstverständlich nicht streng, denn der Möglichkeit, daß sich auch die Koeffizienten des Skalenwertes und der Orientierung infolge der neuen Unbekannten ändern können, tragen die Ansätze (68) und (69) keine Rechnung. Der Betrag des begangenen Fehlers hängt von der Verteilung der Anhaltsterne ab, bei vollkommen radialsymmetrischer Anordnung würde er offensichtlich verschwinden. Sind jedoch die Sterne stark unsymmetrisch verteilt, so empfiehlt es sich, in aller Strenge vorzugehen und sämtliche Unbekannte von vornherein einzuführen, d. h. eine spezielle Form des Ansatzes (67) anzuwenden.

Bei größeren Plattenserien, wie sie etwa bei der photographischen Himmelskarte oder den Neubeobachtungen der A G-Kataloge zur Verfügung stehen, liegen die Verhältnisse wesentlich anders. Es kann in solchen Fällen durch Ordnen der Ausgleichungsreste nach verschiedenen Argumenten eine ganze Reihe von Fehlern, außer den bereits genannten z. B. auch Helligkeitsgleichung, Fehler des Meßapparates u. dgl., ermittelt werden.

22 Gesamtübersicht über den Reduktionsgang Erklärung der Bezeichnungen siehe Ziff 2

Refraktion [Restrefraktion und höhere Glieder, Ziff 16, Formeln (49) bis (53)]

¹ SCHLESINGER, Yale Obs. Transactions 5, S. (13) (1926)

² Vgl. Ziff 13, letzter Absatz sowie V J S 63, S. 291 (1928)

³ Vgl. ZURHELYN, Darlegung und Kritik usw., S. 77 u. 78 (1904), V J S 63, S. 283 (1928)

N und $\cotg n$ aus parallaktischen Tafeln

$$k_1 = \frac{\cotg n}{\sin(N + \mathfrak{D})}, \quad k_2 = \cotg(N + \mathfrak{D})$$

Wenn parallaktische Tafeln nicht vorhanden

$$\tg N = \cotg \varphi \sin t$$

$$k_1 = \frac{\tg t \sin N}{\sin(N + \mathfrak{D})}, \quad k_2 = \cotg(N + \mathfrak{D})$$

$$k_3 = 1 + k_1^2, \quad k_4 = 1 + k_2^2$$

$$\tg \chi = \frac{k_1}{k_2}, \quad \tg \zeta = \frac{k_1}{\sin \chi} = \frac{k_2}{\cos \chi}$$

β aus den Tafeln in Anhang II

$$\beta' = -0'',087$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= 2[\beta + 2\beta'(1 + k_1^2 + k_2^2)]k_1k_2y - \beta k_1k_2x^2 - 2\beta k_1^2k_2xy + \beta k_1k_4y^2 \\ &\quad + \beta k_3^2x^3 + 3\beta k_1k_2k_3x^2y + \beta(k_3k_4 + 2k_1^2k_2^2)xy^2 + \beta k_1k_2k_4y^3, \\ \Delta y &= [\beta + 2\beta'(1 + k_1^2 + k_2^2)](k_2^2 - k_1^2)y - \beta k_2k_3x^2 - 2\beta k_1k_2^2xy - \beta k_2k_4y^2 \\ &\quad + \beta k_1k_2k_3x^3 + \beta(k_3k_4 + 2k_1^2k_2^2)x^2y + 3\beta k_1k_2k_4xy^2 + \beta k_4^2y^3 \end{aligned} \right\} \quad (70)$$

Aberration [Ziff 17, Formeln (60) und (61)]

H, h, \imath = „Reduktionsgrößen“ der Ephemeridensammlungen

$$R = h \sin(H + \mathfrak{U})$$

$$S = h \cos(H + \mathfrak{U}) + \imath \cos \mathfrak{D}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= Sxy + \frac{1}{2}R(x^2 - y^2), \\ \Delta y &= Rxy - \frac{1}{2}S(x^2 - y^2) \end{aligned} \right\} \quad (71)$$

Plattenneigung [Ziff 13, Formeln (20)]

p, q = Koordinaten des wahren Tangentialpunktes in bezug auf den Nullpunkt des Systems der gemessenen Koordinaten x, y

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= px^2 + qxy, \\ \Delta y &= pxy + qy^2 \end{aligned} \right\} \quad (72)$$

(70), (71) und (72) werden zu folgendem Formelpaar zusammengefaßt

$$\left. \begin{aligned} \xi - x &= ay + bx^2 + cxy + dy^2 + ex^3 + \\ \eta - y &= a'y + b'x^2 + c'xy + d'y^2 + e'x^3 + \end{aligned} \right\} \quad (73)$$

Hiermit sind die ξ, η der Anhaltsterne zu berechnen. Dann werden die bekannten α, δ der Anhaltsterne in Tangentialkoordinaten X, Y , bezogen auf den Tangentialpunkt der Platte, dessen $\mathfrak{U}, \mathfrak{D}$ nach Ziff 19 zu ermitteln ist, verwandelt (Ziff 10 und Anhang I) und die Plattenkonstanten A, B, C und D aus

$$\left. \begin{aligned} X - \xi &= Ax + By + C, \\ Y - \eta &= -Bx + Ay + D \end{aligned} \right\} \quad (74)$$

durch Ausgleichung bestimmt. An Stelle von (74) können auch andere Ansätze treten, die Formeln (73) vereinfachen sich dann durch Fortfall eines Teils der Glieder (vgl. Ziff. 20)

Die Tangentialkoordinaten X, Y der neu zu bestimmenden Sterne, bezogen auf den Tangentialpunkt $\mathfrak{A}, \mathfrak{D}$, folgen aus den durch Vereinigung von (73) und (74) entstehenden Gleichungen

$$\left. \begin{aligned} X - x &= A_0 x + B_0 y + C + b x^2 + c xy + \\ Y - y &= A'_0 x + B'_0 y + D + b' x^2 + c' xy + \end{aligned} \right\} \quad (75)$$

X, Y sind nach Ziff. 10 und Anhang I in α, δ zu verwandeln

Anhang I. Hilfstafeln zur Transformation tangentialer Koordinaten in α, δ und umgekehrt.

Erläuterungen.

A. Rechnung nach den strengen Formeln

In die Formeln (12) und (12') der Ziff. 10 führen wir folgende Hilfsgrößen ein

$$\begin{aligned} T &= \operatorname{tg} \Delta \alpha, \\ \tau &= x - \operatorname{tg} x = -\frac{1}{3} \operatorname{tg}^3 x + \frac{1}{5} \operatorname{tg}^5 x, \\ \tau' &= \operatorname{tg} x - x = +\frac{1}{3} x^3 - \frac{1}{5} x^5 \end{aligned}$$

Hierdurch gehen die genannten Gleichungen über in

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} d &= \operatorname{tg} \delta \sec \Delta \alpha, \\ q &= d - \mathfrak{D}, \\ T &= \Delta \alpha + \tau'(\Delta \alpha), \\ X &= T \cos d \sec q, \\ Y &= q + \tau(q), \end{aligned} \right\} \quad (\text{I})$$

und

$$\left. \begin{aligned} q &= Y + \tau(Y), \\ d &= \mathfrak{D} + q, \\ T &= X \sec d \cos q, \\ \Delta \alpha &= T + \tau(T), \\ \operatorname{tg} \delta &= \operatorname{tg} d \cos \Delta \alpha \end{aligned} \right\} \quad (\text{I}')$$

Einheit für X, Y, T, τ, τ' und alle Winkelgrößen ist die Bogensekunde. τ und τ' sind mit den angegebenen Argumenten aus Tafel 1 zu entnehmen. Im ersten Teil dieser Tafel, wo sich τ und τ' dem absoluten Betrag nach nicht unterscheiden, ist für beide Größen nur eine Wertreihe gegeben und das Vorzeichen in sofort verständlicher Weise zum Ausdruck gebracht. Die (innerhalb des ersten halben Grades) auf 0'',001 angesetzten Werte von τ und τ' werden bei der Rechnung nach den Gleichungen (III') benutzt (vgl. dort).

B Rechnung nach den Reihenentwicklungen

Ist $\Delta\alpha \leq 30^m$, so empfiehlt sich die Anwendung der Gleichungen (14) und (14') in Ziff 10, welche nach Einführung obiger Hilfsgrößen folgendermaßen lauten

$$\left. \begin{aligned} d &= \delta + \frac{\operatorname{tg}^2 \frac{\Delta\alpha}{2}}{\sin 1''} \sin 2\delta + \frac{1}{2} \frac{\operatorname{tg}^4 \frac{\Delta\alpha}{2}}{\sin 1''} \sin 4\delta, \\ q &= d - \mathfrak{D}, \\ T &= \Delta\alpha + \tau(\Delta\alpha), \\ X &= T \cos d \sec q, \\ Y &= q + \tau(q), \end{aligned} \right\} \quad (\text{II})$$

und

$$\left. \begin{aligned} q &= Y + \tau(Y), \\ d &= \mathfrak{D} + q, \\ T &= X \sec d \cos q, \\ \Delta\alpha &= T + \tau(T), \\ \delta &= d - \frac{\operatorname{tg}^2 \frac{\Delta\alpha}{2}}{\sin 1''} \sin 2d + \frac{1}{2} \frac{\operatorname{tg}^4 \frac{\Delta\alpha}{2}}{\sin 1''} \sin 4d \end{aligned} \right\} \quad (\text{II}')$$

Einheit für X, Y, T, τ, τ' und alle Winkelgrößen ist die Bogensekunde.

Die Werte $\frac{\operatorname{tg}^2 \frac{\Delta\alpha}{2}}{\sin 1''}$ und $\frac{1}{2} \frac{\operatorname{tg}^4 \frac{\Delta\alpha}{2}}{\sin 1''}$ sind jedoch mit dem in Zeitmaß ausgedruckten $\Delta\alpha$ als Argument den Tafeln 2 und 3 zu entnehmen. Tafel 4 gibt die Faktoren $\sin 4\delta$ bzw. $\sin 4d$. Ist $\Delta\alpha > 25^m$, so müssen diese Faktoren aus einer Sinustafel dreistellig entnommen werden, um $0'',01$ rechnerisch zu sichern.

Wenn $\Delta\alpha \leq 5^m$ ist, so entfällt das Glied mit $\operatorname{tg}^4 \frac{\Delta\alpha}{2}$, man kann ferner $\operatorname{tg}^2 \frac{\Delta\alpha}{2}$ mit einem Fehler $< 0'',01$ durch $\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right)^2$ ersetzen. Wird endlich $\Delta\alpha$ in Zeitsekunden ausgedrückt, so lauten die Formeln zur Berechnung von d aus δ und umgekehrt

$$d = \delta + \frac{9}{16} 10^6 \sin 1'' \sin 2\delta \left(\frac{\Delta\alpha'}{100}\right)^2,$$

$$\delta = d - \frac{9}{16} 10^6 \sin 1'' \sin 2d \left(\frac{\Delta\alpha'}{100}\right)^2$$

Die Koeffizienten von $\left(\frac{\Delta\alpha'}{100}\right)^2$ sind identisch mit der später noch einzuführenden Größe b_1 (vgl S 543), so daß die vorstehenden Gleichungen übergehen in

$$d = \delta + b_1(\delta) \left(\frac{\Delta\alpha'}{100}\right)^2,$$

$$\delta = d - b_1(d) \left(\frac{\Delta\alpha'}{100}\right)^2,$$

worin b_1 mit den angegebenen Argumenten aus Tafel 5 zu entnehmen ist. Rechnerischen Vorteil bieten diese Gleichungen jedoch nur, wenn die Produkte $b_1(\delta) \left(\frac{\Delta\alpha'}{100}\right)^2$ bzw. $b_1(d) \left(\frac{\Delta\alpha'}{100}\right)^2$ mit einer einzigen Stellung des Rechenschiebers gerechnet werden können, so daß die Quadrate nicht besonders gebildet und hingeschrieben zu werden brauchen.

Die nach Potenzen von $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$ bzw. X , Y fortschreitenden Reihenentwicklungen (15a), (15b) und (16) der Ziff 10 sind, wie schon erwähnt, nur dann rechnerisch vorteilhaft, wenn die Glieder 4. Ordnung entfallen können. Die Reihen kommen demgemäß für $\mathfrak{D} \leq 60^\circ$ in folgenden Fällen in Betracht:

1. Zur genäherten Rechnung auf ca. $1'$ (z. B. für Identifikationszwecke) bei Plattenfeldern bis $10^\circ \times 10^\circ$.

2. Zur scharfen Rechnung auf $0'',01$ bei kleinen Plattenfeldern bis höchstens $1^\circ \times 1^\circ$.

Mit Ausnahme der ersten Gleichung (16) enthalten alle Reihen je zwei Glieder 3. Ordnung. Von diesen sind die Glieder $\frac{1}{3} \Delta\delta^3$ und $\frac{1}{3} Y^3$ völlig, $\frac{1}{3} X^3 \sec^2 \mathfrak{D}$ bis auf den Faktor $\sec^3 \mathfrak{D}$ mit τ oder τ' identisch, so daß Tafel 1 zur Entnahme bzw. Berechnung dieser Glieder dienen kann. Werden X , Y und $\Delta\delta$ in Bogen Sekunden, $\Delta\alpha$ in Zeitsekunden ausgedrückt, so lauten die Reihen:

$$X'' = 15 \cos \mathfrak{D} \Delta\alpha'' - \frac{3}{2} 10^6 \sin 1'' \sin \mathfrak{D} \frac{\Delta\alpha''}{100} \frac{\Delta\delta''}{1000} + \frac{9}{16} 10^9 \sin^2 1'' \cos \mathfrak{D} (3 \cos^2 \mathfrak{D} - 1) \left(\frac{\Delta\alpha''}{100} \right)^3,$$

$$Y'' = \Delta\delta'' + \tau'(\Delta\delta'') + \frac{9}{16} 10^6 \sin 1'' \sin 2\mathfrak{D} \left(\frac{\Delta\alpha''}{100} \right)^2 + \frac{9}{8} 10^9 \sin^2 1'' \cos 2\mathfrak{D} \left(\frac{\Delta\alpha''}{100} \right)^2 \frac{\Delta\delta''}{1000},$$

$$\begin{aligned} \Delta\alpha'' = \frac{1}{15} \sec \mathfrak{D} [X'' + \tau(X'') \sec^2 \mathfrak{D}] + \frac{1}{15} 10^6 \sin 1'' \sec \mathfrak{D} \operatorname{tg} \mathfrak{D} \frac{X''}{1000} \frac{Y''}{1000} \\ + \frac{1}{15} 10^9 \sin^2 1'' \sec \mathfrak{D} \operatorname{tg}^2 \mathfrak{D} \frac{X''}{1000} \left(\frac{Y''}{1000} \right)^2, \end{aligned}$$

$$\Delta\delta'' = Y'' + \tau(Y'') - \frac{1}{2} 10^6 \sin 1'' \operatorname{tg} \mathfrak{D} \left(\frac{X''}{1000} \right)^2 - \frac{1}{2} 10^9 \sin^2 1'' \sec^2 \mathfrak{D} \left(\frac{X''}{1000} \right)^2 \frac{Y''}{1000}.$$

Wird hierin gesetzt

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= -\frac{3}{2} 10^6 \sin 1'' \sin \mathfrak{D}, & a_1 &= +\frac{1}{15} 10^6 \sin 1'' \sec \mathfrak{D} \operatorname{tg} \mathfrak{D}, \\ a_2 &= +\frac{9}{16} 10^9 \sin^2 1'' \cos \mathfrak{D} (3 \cos^2 \mathfrak{D} - 1), & a_2 &= +\frac{1}{15} 10^9 \sin^2 1'' \sec \mathfrak{D} \operatorname{tg}^2 \mathfrak{D}, \\ b_1 &= +\frac{9}{16} 10^6 \sin 1'' \sin 2\mathfrak{D}, & d_1 &= -\frac{1}{2} 10^6 \sin 1'' \operatorname{tg} \mathfrak{D}, \\ b_2 &= +\frac{9}{8} 10^9 \sin^2 1'' \cos 2\mathfrak{D}, & d_2 &= -\frac{1}{2} 10^9 \sin^2 1'' \sec^2 \mathfrak{D}, \end{aligned} \right\}$$

so entsteht

$$\left. \begin{aligned} X'' &= 15 \cos \mathfrak{D} \Delta\alpha'' + a_1 \frac{\Delta\alpha''}{100} \frac{\Delta\delta''}{1000} + a_2 \left(\frac{\Delta\alpha''}{100} \right)^3, \\ Y'' &= \Delta\delta'' + \tau'(\Delta\delta'') + b_1 \left(\frac{\Delta\alpha''}{100} \right)^2 + b_2 \left(\frac{\Delta\alpha''}{100} \right)^2 \frac{\Delta\delta''}{1000}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{III})$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha'' &= \frac{1}{15} \sec \mathfrak{D} [X'' + \tau(X'') \sec^2 \mathfrak{D}] + a_1 \frac{X''}{1000} \frac{Y''}{1000} + a_2 \frac{X''}{1000} \left(\frac{Y''}{1000} \right)^2, \\ \Delta\delta'' &= Y'' + \tau(Y'') + d_1 \left(\frac{X''}{1000} \right)^2 + d_2 \left(\frac{X''}{1000} \right)^2 \frac{Y''}{1000} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III}')$$

Samtliche Koeffizienten in diesen Formeln hängen nur von \mathfrak{D} , nicht von den Koordinaten oder der Deklination der Sterne ab. Für alle Transformationen auf einer Platte oder auf einer Serie von Platten, deren Tangentialpunkte dieselbe Deklination haben, sind also $15 \cos \mathfrak{D}$ und $\frac{1}{15} \sec \mathfrak{D}$ nur einmal zu rechnen, die übrigen Faktoren (a_1 , a_2 , b_1 , b_2 und $\sec^2 \mathfrak{D}$) nur einmal mit dem Argument \mathfrak{D} den Tafeln 5 und 6 zu entnehmen, τ und τ' jedoch für jeden einzelnen Stern mit den angegebenen Argumenten aus Tafel 1.

(Fortsetzung S. 552)

Tafel 1

Argument	τ	τ'	Argument	τ	τ'	Argument	τ	τ'	
0° 0' 0"	-0,000+	1° 0' 3600"	-0,37	2° 0' 7200"	-2,92	8	+2,92	8	
1 60	0,000	1 3660	0,38	1 7260	3,00	7	3,00	8	
2 120	0,000	2 3720	0,40	2 7320	3,07	8	3,07	8	
3 180	0,000	3 3780	0,42	3 7380	3,15	8	3,15	8	
4 240	0,000	4 3840	0,44	4 7440	3,22	7	3,22	7	
0 5 300	-0,000+	1 5 3900	-0,46	2 5 7500	-3,30	8	-3,30	8	
6 360	0,000	6 3960	0,49	6 7560	3,38	8	3,38	8	
7 420	0,001	7 4020	0,51	7 7620	3,46	8	3,46	8	
8 480	0,001	8 4080	0,53	8 7680	3,55	8	3,55	8	
9 540	0,001	9 4140	0,56	9 7740	3,63	8	3,63	8	
0 10 600	-0,002+	1 10 4200	-0,58	2 10 7800	-3,71	9	-3,72	9	
11 660	0,002	11 4260	0,61	11 7860	3,80	9	3,81	9	
12 720	0,003	12 4320	0,63	12 7920	3,89	9	3,90	9	
13 780	0,004	13 4380	0,66	13 7980	3,98	9	3,99	9	
14 840	0,005	14 4440	0,69	14 8040	4,07	9	4,08	9	
0 15 900	-0,006+	1 15 4500	-0,71	2 15 8100	-4,16	9	-4,17	9	
16 960	0,007	16 4560	0,74	16 8160	4,25	10	4,26	10	
17 1020	0,008	17 4620	0,77	17 8220	4,35	9	4,36	9	
18 1080	0,010	18 4680	0,80	18 8280	4,44	10	4,45	10	
19 1140	0,012	19 4740	0,83	19 8340	4,54	10	4,55	10	
0 20 1200	-0,014+	1 20 4800	-0,87	2 20 8400	-4,64	10	-4,65	10	
21 1260	0,016	21 4860	0,90	21 8460	4,74	10	4,75	10	
22 1320	0,018	22 4920	0,93	22 8520	4,84	10	4,85	10	
23 1380	0,021	23 4980	0,97	23 8580	4,94	11	4,95	11	
24 1440	0,023	24 5040	1,00	24 8640	5,05	10	5,06	10	
0 25 1500	-0,026+	1 25 5100	-1,04	2 25 8700	-5,15	11	-5,16	11	
26 1560	0,030	26 5160	1,08	26 8760	5,26	11	5,27	11	
27 1620	0,033	27 5220	1,11	27 8820	5,37	11	5,38	11	
28 1680	0,037	28 5280	1,15	28 8880	5,48	11	5,49	11	
29 1740	0,041	29 5340	1,19	29 8940	5,59	12	5,60	12	
0 30 1800	-0,046+	1 30 5400	-1,23	2 30 9000	-5,71	11	-5,72	12	
31 1860	0,05	31 5460	1,27	31 9060	5,82	12	5,83	12	
32 1920	0,06	32 5520	1,32	32 9120	5,94	12	5,95	12	
33 1980	0,06	33 5580	1,36	33 9180	6,05	11	6,06	11	
34 2040	0,07	34 5640	1,40	34 9240	6,17	12	6,18	12	
0 35 2100	-0,07+	1 35 5700	-1,45	2 35 9300	-6,29	12	-6,30	12	
36 2160	0,08	36 5760	1,50	36 9360	6,42	13	6,43	13	
37 2220	0,09	37 5820	1,54	37 9420	6,54	13	6,55	13	
38 2280	0,09	38 5880	1,59	38 9480	6,67	12	6,68	12	
39 2340	0,10	39 5940	1,64	39 9540	6,79	12	6,80	12	
0 40 2400	-0,11+	1 40 6000	-1,69	2 40 9600	-6,92	13	-6,93	13	
41 2460	0,12	41 6060	1,74	41 9660	7,05	14	7,07	14	
42 2520	0,13	42 6120	1,79	42 9720	7,19	14	7,21	14	
43 2580	0,13	43 6180	1,85	43 9780	7,32	13	7,34	13	
44 2640	0,14	44 6240	1,90	44 9840	7,45	13	7,47	13	
0 45 2700	-0,15+	1 45 6300	-1,96	2 45 9900	-7,59	14	-7,61	14	
46 2760	0,16	46 6360	2,01	46 9960	7,73	14	7,75	14	
47 2820	0,18	47 6420	2,07	47 10020	7,87	14	7,89	14	
48 2880	0,19	48 6480	2,13	48 10080	8,01	15	8,03	15	
49 2940	0,20	49 6540	2,19	49 10140	8,16	15	8,18	15	
0 50 3000	-0,21+	1 50 6600	-2,25	2 50 10200	-8,30	15	-8,32	15	
51 3060	0,22	51 6660	2,31	51 10260	8,45	15	8,47	15	
52 3120	0,24	52 6720	2,38	52 10320	8,60	15	8,62	15	
53 3180	0,25	53 6780	2,44	53 10380	8,75	15	8,77	15	
54 3240	0,27	54 6840	2,51	54 10440	8,90	15	8,92	15	
0 55 3300	-0,28+	1 55 6900	-2,57	2 55 10500	-9,06	16	-9,08	16	
56 3360	0,30	56 6960	2,64	56 10560	9,21	15	9,24	16	
57 3420	0,31	57 7020	2,71	57 10620	9,37	16	9,40	16	
58 3480	0,33	58 7080	2,78	58 10680	9,53	16	9,56	16	
59 3540	0,35	59 7140	2,85	59 10740	9,69	16	9,72	16	
1 0 3600	-0,37+	2 0 7200	-2,92	3 0 10800	-9,85	16	-9,88	16	

Bei negativen Argumentwerten kehren sich die Vorzeichen um

Tafel 1 (Fortsetzung)

Argument	τ	τ'				Argument	τ	τ'			
3° 0' 10800''	-9'85	+9'88	16	17	18	4° 0' 14400''	-23'33	+23'45	31	32	33
1 10860	10,02	10,05	1''	0,3	0,3	1 14460	23,62	23,74	1''	0,5	0,5
2 10920	10,19	10,22	2	0,5	0,6	2 14520	23,91	24,03	2	1,0	1,1
3 10980	10,35	10,38	3	0,8	0,8	3 14580	24,21	24,33	3	1,6	1,6
4 11040	10,52	10,55	4	1,1	1,1	4 14640	24,51	24,64	4	2,1	2,1
5 11100	-10,70	+10,73	5	1,3	1,4	5 14700	-24,81	+24,94	5	2,6	2,7
6 11160	10,87	10,90	6	1,6	1,7	6 14760	25,12	25,25	6	3,1	3,2
7 11220	11,05	11,08	7	1,9	2,0	7 14820	25,42	25,56	7	3,6	3,7
8 11280	11,22	11,26	8	2,1	2,3	8 14880	25,73	25,87	8	4,1	4,3
9 11340	11,40	11,44	9	2,4	2,6	9 14940	26,04	26,18	9	4,6	4,8
10 11400	-11,59	+11,63	10	2,7	2,8	10 15000	-26,36	+26,50	10	5,2	5,3
11 11460	11,77	11,81	11	3,0	3,1	11 15060	26,68	26,82	11	5,7	5,8
12 11520	11,96	12,00	12	3,3	3,5	12 15120	27,00	27,15	12	10,3	10,7
13 11580	12,14	12,18	13	3,6	3,7	13 15180	27,32	27,47	13	15,5	16,0
14 11640	12,33	12,37	14	3,9	4,0	14 15240	27,64	27,80	14	20,7	21,3
15 11700	-12,52	+12,56	15	4,2	4,3	15 15300	-27,97	+28,13	15	25,8	26,5
16 11760	12,72	12,76	16	4,5	4,6	16 15360	28,30	28,46	16	30,9	31,6
17 11820	12,91	12,95	17	4,8	4,9	17 15420	28,63	28,80	17	36,0	36,8
18 11880	13,11	13,15	18	5,1	5,2	18 15480	28,97	29,14	18	41,1	42,0
19 11940	13,31	13,35	19	5,4	5,5	19 15540	29,30	29,47	19	46,2	47,2
20 12000	-13,51	+13,56	20	5,7	5,8	20 15600	-29,64	+29,81	20	51,3	52,4
21 12060	13,71	13,76	21	6,0	6,1	21 15660	29,99	30,16	21	56,4	57,6
22 12120	13,92	13,97	22	6,3	6,4	22 15720	30,33	30,51	22	61,5	62,8
23 12180	14,13	14,18	23	6,6	6,7	23 15780	30,68	30,86	23	66,6	68,0
24 12240	14,34	14,39	24	6,9	7,0	24 15840	31,03	31,22	24	71,7	73,2
25 12300	-14,55	+14,60	25	7,2	7,3	25 15900	-31,38	+31,57	25	76,8	78,4
26 12360	14,76	14,81	26	7,5	7,6	26 15960	31,74	31,93	26	81,9	83,6
27 12420	14,98	15,03	27	7,8	7,9	27 16020	32,10	32,30	27	87,0	88,8
28 12480	15,20	15,26	28	8,1	8,2	28 16080	32,46	32,66	28	92,1	94,0
29 12540	15,42	15,48	29	8,4	8,5	29 16140	32,82	33,03	29	97,2	99,2
30 12600	-15,64	+15,70	30	8,7	8,8	30 16200	-33,19	+33,40	30	102,3	104,4
31 12660	15,86	15,92	31	9,0	9,1	31 16260	33,56	33,77	31	107,4	109,6
32 12720	16,09	16,15	32	9,3	9,4	32 16320	33,93	34,15	32	112,5	114,8
33 12780	16,32	16,38	33	9,6	9,7	33 16380	34,30	34,52	33	117,6	120,0
34 12840	16,55	16,62	34	9,9	10,0	34 16440	34,68	34,90	34	122,7	125,2
35 12900	-16,78	+16,85	35	10,2	10,3	35 16500	-35,06	+35,29	35	127,8	130,4
36 12960	17,01	17,08	36	10,5	10,6	36 16560	35,44	35,67	36	132,9	135,6
37 13020	17,25	17,32	37	10,8	10,9	37 16620	35,83	36,06	37	138,0	140,8
38 13080	17,49	17,56	38	11,1	11,2	38 16680	36,22	36,46	38	143,1	146,0
39 13140	17,73	17,80	39	11,4	11,5	39 16740	36,61	36,85	39	148,2	151,2
40 13200	-17,98	+18,05	40	11,7	11,8	40 16800	-37,00	+37,25	40	153,3	156,4
41 13260	18,22	18,30	41	12,0	12,1	41 16860	37,40	37,65	41	158,4	161,6
42 13320	18,47	18,55	42	12,3	12,4	42 16920	37,80	38,06	42	163,5	166,8
43 13380	18,72	18,80	43	12,6	12,7	43 16980	38,20	38,46	43	168,6	172,0
44 13440	18,97	19,05	44	12,9	13,0	44 17040	38,61	38,87	44	173,7	177,2
45 13500	-19,23	+19,31	45	13,2	13,3	45 17100	-39,01	+39,29	45	178,8	182,4
46 13560	19,48	19,57	46	13,5	13,6	46 17160	39,43	39,71	46	183,9	187,6
47 13620	19,74	19,83	47	13,8	13,9	47 17220	39,84	40,13	47	189,0	192,8
48 13680	20,01	20,10	48	14,1	14,2	48 17280	40,26	40,55	48	194,1	198,0
49 13740	20,27	20,36	49	14,4	14,5	49 17340	40,68	40,97	49	199,2	203,2
50 13800	-20,54	+20,63	50	14,7	14,8	50 17400	-41,10	+41,40	50	204,3	208,4
51 13860	20,80	20,90	51	15,0	15,1	51 17460	41,52	41,83	51	209,4	213,6
52 13920	21,07	21,17	52	15,3	15,4	52 17520	41,95	42,26	52	214,5	218,8
53 13980	21,35	21,45	53	15,6	15,7	53 17580	42,38	42,70	53	219,6	224,0
54 14040	21,62	21,72	54	15,9	16,0	54 17640	42,82	43,14	54	224,7	229,2
55 14100	-21,90	+22,00	55	16,2	16,3	55 17700	-43,25	+43,58	55	229,8	234,4
56 14160	22,18	22,29	56	16,5	16,6	56 17760	43,69	44,02	56	234,9	239,6
57 14220	22,46	22,57	57	16,8	16,9	57 17820	44,14	44,47	57	240,0	244,8
58 14280	22,75	22,86	58	17,1	17,2	58 17880	44,58	44,92	58	245,1	250,0
59 14340	23,04	23,15	59	17,4	17,5	59 17940	45,03	45,38	59	250,2	255,2
60 14400	-23,33	+23,45	60	17,7	17,8	60 18000	-45,48	+45,83	60	255,3	260,4

Bei negativen Argumentwerten kehren sich die Vorzeichen um

Tafel 2.
 $\frac{\operatorname{tg}^2 \frac{\Delta \alpha}{2}}{\sin 1''}$

$\Delta \alpha$	0 ^m	1 ^m	2 ^m	3 ^m	4 ^m	5 ^m	6 ^m	7 ^m	8 ^m	9 ^m
0°	0,000 0	0,098 3	3,993 6	8,884 9	15,771 13	24,555 16	35,35 19	48,11 23	62,84 27	79,54 30
1	0,000 0	1,01 4	3,99 7	8,93 10	15,84 13	24,71 16	35,54 20	48,34 23	63,11 26	79,84 29
2	0,000 0	1,05 3	4,06 7	9,03 10	15,97 13	24,87 17	35,74 20	48,57 23	63,37 26	80,13 30
3	0,000 0	1,08 4	4,13 6	9,13 10	16,10 14	25,04 16	35,94 20	48,80 23	63,63 27	80,43 30
4	0,000 1	1,12 3	4,19 7	9,23 10	16,24 13	25,20 17	36,14 20	49,03 24	63,90 26	80,73 29
5	0,01 0	1,15 4	4,26 7	9,33 10	16,37 13	25,37 17	36,34 20	49,27 23	64,16 27	81,02 30
6	0,01 0	1,19 3	4,33 7	9,43 11	16,50 14	25,54 16	36,54 20	49,50 23	64,43 26	81,32 30
7	0,01 1	1,22 3	4,40 7	9,54 10	16,64 14	25,70 17	36,74 20	49,73 23	64,69 27	81,62 30
8	0,02 0	1,26 4	4,47 7	9,64 10	16,77 14	25,87 17	36,94 20	49,96 24	64,96 26	81,92 30
9	0,02 1	1,30 4	4,54 7	9,74 10	16,91 14	26,04 17	37,14 20	50,20 23	65,22 27	82,22 30
10	0,03 0	1,34 3	4,61 7	9,84 11	17,05 13	26,21 17	37,34 20	50,43 24	65,49 27	82,52 30
11	0,03 0	1,37 4	4,68 7	9,95 10	17,18 14	26,38 17	37,54 20	50,67 23	65,76 27	82,82 30
12	0,04 1	1,41 4	4,75 7	10,05 11	17,32 14	26,55 17	37,74 21	50,90 24	66,03 27	83,12 30
13	0,05 0	1,45 4	4,82 8	10,16 10	17,46 14	26,72 17	37,95 21	51,14 23	66,30 26	83,42 30
14	0,05 1	1,49 4	4,90 7	10,26 11	17,60 13	26,89 17	38,15 20	51,37 24	66,56 27	83,72 30
15	0,06 1	1,53 5	4,97 7	10,37 11	17,73 14	27,06 17	38,35 21	51,61 24	66,83 28	84,02 31
16	0,07 1	1,58 5	5,04 8	10,48 10	17,87 14	27,23 18	38,56 20	51,85 24	67,11 27	84,33 30
17	0,08 1	1,62 4	5,12 7	10,58 11	18,01 14	27,41 17	38,76 21	52,09 24	67,38 27	84,63 30
18	0,09 1	1,66 4	5,19 8	10,69 11	18,15 14	27,58 17	38,97 21	52,33 24	67,65 27	84,93 31
19	0,10 1	1,70 5	5,27 8	10,80 11	18,29 15	27,75 18	39,18 20	52,57 24	67,92 27	85,24 30
20	0,11 1	1,75 4	5,35 7	10,91 11	18,44 14	27,93 17	39,38 21	52,81 24	68,19 28	85,54 31
21	0,12 1	1,79 4	5,42 8	11,02 11	18,58 14	28,10 18	39,59 21	53,05 24	68,47 27	85,85 31
22	0,13 1	1,83 5	5,50 8	11,13 11	18,72 14	28,28 17	39,80 21	53,29 24	68,74 27	86,16 30
23	0,14 1	1,88 4	5,58 7	11,24 11	18,86 15	28,45 18	40,01 21	53,53 24	69,01 28	86,46 31
24	0,16 1	1,92 5	5,65 8	11,35 11	19,01 14	28,63 18	40,22 21	53,77 24	69,29 27	86,77 31
25	0,17 1	1,97 5	5,73 8	11,46 11	19,15 15	28,81 17	40,43 21	54,01 25	69,56 28	87,08 31
26	0,18 2	2,02 4	5,81 8	11,57 12	19,30 14	28,98 18	40,64 21	54,26 24	69,84 28	87,39 31
27	0,20 1	2,06 5	5,89 8	11,69 11	19,44 15	29,16 18	40,85 21	54,50 24	70,12 27	87,70 31
28	0,21 2	2,11 5	5,97 8	11,80 11	19,59 14	29,34 18	41,06 21	54,74 25	70,39 28	88,01 31
29	0,23 2	2,16 5	6,05 9	11,91 12	19,73 15	29,52 18	41,27 21	54,99 24	70,67 28	88,32 31

30	0,25 1	2,21 5	6,14 8	12,03 11	19,88 15	29,70 18	41,48 22	55,23 25	70,95 28	88,63 31
31	0,26 2	2,26 5	6,22 8	12,14 12	20,03 15	29,88 18	41,70 21	55,48 25	71,23 28	88,94 31
32	0,28 2	2,31 5	6,30 8	12,26 11	20,18 15	30,06 18	41,91 22	55,73 24	71,51 28	89,25 31
33	0,30 2	2,36 5	6,38 9	12,37 12	20,33 15	30,24 19	42,13 21	55,97 25	71,79 28	89,56 32
34	0,32 1	2,41 5	6,47 8	12,49 12	20,48 14	30,43 18	42,34 22	56,22 25	72,07 28	89,88 31
35	0,33 2	2,46 5	6,55 9	12,61 11	20,62 16	30,61 18	42,56 21	56,47 25	72,35 28	90,19 31
36	0,35 2	2,51 6	6,64 8	12,72 12	20,78 15	30,79 18	42,77 22	56,72 25	72,63 28	90,50 32
37	0,37 2	2,57 5	6,72 9	12,84 12	20,93 15	30,97 19	42,99 21	56,97 25	72,91 28	90,82 31
38	0,39 2	2,62 5	6,81 8	12,96 12	21,08 15	31,16 18	43,20 22	57,22 25	73,19 28	91,13 32
39	0,41 3	2,67 6	6,89 9	13,08 12	21,23 15	31,34 19	43,42 22	57,47 25	73,47 29	91,45 32
40	0,44 2	2,73 5	6,98 9	13,20 12	21,38 15	31,53 18	43,64 22	57,72 25	73,76 28	91,77 31
41	0,46 2	2,78 6	7,07 9	13,32 12	21,53 16	31,71 19	43,86 22	57,97 25	74,04 29	92,08 32
42	0,48 2	2,84 5	7,16 9	13,44 12	21,69 15	31,90 19	44,08 22	58,22 25	74,33 28	92,40 32
43	0,50 3	2,89 5	7,25 8	13,56 12	21,84 16	32,09 18	44,30 22	58,47 25	74,61 29	92,72 32
44	0,53 2	2,95 6	7,33 9	13,68 13	22,00 15	32,27 19	44,52 22	58,72 26	74,90 28	93,04 32
45	0,55 3	3,01 5	7,42 9	13,81 12	22,15 16	32,46 19	44,74 22	58,98 25	75,18 29	93,36 32
46	0,58 2	3,06 6	7,51 10	13,93 12	22,31 15	32,65 19	44,96 22	59,23 26	75,47 29	93,68 32
47	0,60 3	3,12 6	7,61 9	14,05 13	22,46 16	32,84 19	45,18 22	59,49 25	75,76 29	94,00 32
48	0,63 2	3,18 6	7,70 9	14,18 12	22,62 16	33,03 19	45,40 23	59,74 26	76,05 28	94,32 32
49	0,65 3	3,24 6	7,79 9	14,30 13	22,78 16	33,22 19	45,63 22	60,00 25	76,33 29	94,64 32
50	0,68 3	3,30 6	7,88 9	14,43 12	22,94 16	33,41 19	45,85 22	60,25 26	76,62 29	94,96 32
51	0,71 3	3,36 6	7,97 10	14,55 13	23,10 15	33,60 19	46,07 23	60,51 26	76,91 29	95,28 32
52	0,74 3	3,42 6	8,07 9	14,68 13	23,25 16	33,79 20	46,30 22	60,77 25	77,20 29	95,60 33
53	0,77 3	3,48 6	8,16 10	14,81 12	23,41 16	33,99 19	46,52 23	61,02 26	77,49 29	95,93 32
54	0,80 3	3,54 7	8,26 9	14,93 13	23,57 16	34,18 19	46,75 22	61,28 26	77,78 30	96,25 33
55	0,83 3	3,61 6	8,35 10	15,06 13	23,73 17	34,37 20	46,97 23	61,54 26	78,08 29	96,58 32
56	0,86 3	3,67 6	8,45 9	15,19 13	23,90 16	34,57 19	47,20 23	61,80 26	78,37 29	96,90 33
57	0,89 3	3,73 7	8,54 10	15,32 13	24,06 16	34,76 20	47,43 23	62,06 26	78,66 29	97,23 32
58	0,92 3	3,80 6	8,64 10	15,45 13	24,22 16	34,96 19	47,66 22	62,32 26	78,95 29	97,55 33
59	0,95 3	3,86 7	8,74 10	15,58 13	24,38 17	35,15 20	47,88 23	62,58 26	79,25 29	97,88 33
60	0,98	3,93	8,84	15,71	24,55	35,35	48,11	62,84	79,54	98,21

Tafel 2 $\frac{\lg^2 \frac{1}{2}}{\sin 1''}$ (Fortsetzung)

$\Delta\alpha$	10^m	11^m	12^m	13^m	14^m	15^m	16^m	17^m	18^m	19^m
0°	98''21 32	118''84 36	141''44 39	166''00 43	192''54 46	221''05 49	251''53 53	283''99 55	318''44 59	354''82 62
1	98 53 33	119 20 36	141 83 39	166 43 43	193 00 46	221 54 50	252 06 52	284 54 56	319 00 60	355 44 62
2	98 86 33	119 56 36	142 22 40	166 86 42	193 46 46	222 04 49	252 58 53	285 10 56	319 60 59	356 06 63
3	99 19 33	119 52 36	142 62 39	167 28 43	193 92 46	222 53 49	253 11 52	285 66 56	320 19 59	356 69 62
4	99 52 33	120 28 37	143 01 40	167 71 43	194 38 46	223 02 50	253 63 53	286 22 56	320 78 59	357 31 63
5	99 85 33	120 65 36	143 41 39	168 14 43	194 84 46	223 52 49	254 16 53	286 78 56	321 37 59	357 94 63
6	100 18 33	121 01 36	143 80 40	168 57 43	195 30 47	224 01 50	254 69 53	287 34 56	321 96 60	358 57 62
7	100 51 33	121 37 37	144 20 40	169 00 43	195 77 46	224 51 49	255 22 52	287 90 56	322 56 59	359 19 63
8	100 84 34	121 74 36	144 60 40	169 43 43	196 23 46	225 00 50	255 74 53	288 46 56	323 15 60	359 82 63
9	101 18 33	122 10 37	145 00 39	169 86 43	196 69 47	225 50 49	256 27 53	289 02 57	323 75 59	360 45 63
10	101 51 33	122 47 36	145 39 40	170 29 43	197 16 46	225 99 50	256 80 53	289 59 56	324 34 60	361 08 63
11	101 84 33	122 83 37	145 79 40	170 72 43	197 62 47	226 49 50	257 33 53	290 15 56	324 94 60	361 71 63
12	102 17 34	123 20 37	146 19 40	171 15 44	198 09 46	226 99 50	257 86 54	290 71 57	325 54 59	362 34 63
13	102 51 33	123 57 36	146 59 40	171 59 43	198 55 47	227 49 50	258 40 53	291 28 57	326 13 60	362 97 63
14	102 84 34	123 93 37	146 99 40	172 02 43	199 02 46	227 99 50	258 93 53	291 84 57	326 73 60	363 60 63
15	103 18 34	124 30 37	147 39 41	172 45 44	199 48 47	228 49 50	259 46 53	292 41 56	327 33 60	364 23 63
16	103 52 33	124 67 37	147 80 40	172 89 43	199 95 47	228 99 50	259 99 54	292 97 57	327 93 60	364 86 63
17	103 85 34	125 04 37	148 20 40	173 32 44	200 42 47	229 49 50	260 53 53	293 54 57	328 53 60	365 49 63
18	104 19 34	125 41 37	148 60 40	173 76 43	200 89 47	229 99 50	261 06 54	294 11 56	329 13 60	366 12 64
19	104 53 33	125 78 37	149 00 41	174 19 44	201 36 47	230 49 50	261 60 53	294 67 57	329 73 60	366 76 63
20	104 86 34	126 15 37	149 41 40	174 63 44	201 83 47	230 99 51	262 13 54	295 24 57	330 33 60	367 39 64
21	105 20 34	126 52 38	149 81 41	175 07 44	202 30 47	231 50 50	262 67 53	295 81 57	330 93 60	368 03 63
22	105 54 34	126 90 37	150 22 40	175 51 43	202 77 47	232 00 50	263 20 54	296 38 57	331 53 60	368 66 64
23	105 88 34	127 27 37	150 62 41	175 94 44	203 24 47	232 50 51	263 74 54	296 95 57	332 13 61	369 30 63
24	106 22 34	127 64 37	151 03 40	176 38 44	203 71 47	233 01 50	264 28 53	297 52 57	332 74 60	369 93 64
25	106 56 34	128 01 38	151 43 41	176 82 44	204 18 47	233 51 51	264 81 54	298 09 57	333 34 61	370 57 64
26	106 90 35	128 39 37	151 84 41	177 26 44	204 65 48	234 02 50	265 35 54	298 66 57	333 95 60	371 21 63
27	107 25 34	128 76 38	152 25 41	177 70 44	205 13 47	235 52 51	265 89 54	299 23 58	334 55 61	371 84 64
28	107 59 34	129 14 37	152 66 41	178 14 44	205 60 48	235 03 51	266 43 54	299 81 57	335 16 60	372 48 64
29	107 93 35	129 51 38	153 07 40	178 58 45	206 08 47	235 54 51	266 97 54	300 38 57	335 76 61	373 12 64

30	108,28 34	129,89 38	153,47 41	179,03 44	206,55 48	236,05 50	267,51 54	300,95 58	336,37 61	373,76 64
31	108,62 34	130,27 38	153,88 41	179,47 44	207,03 47	236,55 51	268,05 54	301,53 57	336,98 60	374,40 64
32	108,96 35	130,65 38	154,29 42	179,91 45	207,50 48	237,06 51	268,59 55	302,10 58	337,58 61	375,04 64
33	109,31 35	131,02 37	154,71 41	180,36 44	207,98 48	237,57 51	269,14 54	302,68 57	338,19 61	375,68 64
34	109,66 34	131,40 38	155,12 41	180,80 45	208,46 47	238,08 51	269,68 54	303,25 58	338,80 61	376,32 65
35	110,00 35	131,78 38	155,53 41	181,25 44	208,93 48	238,59 51	270,22 55	303,83 58	339,41 61	376,97 64
36	110,35 35	132,16 38	155,94 41	181,69 45	209,41 48	239,10 51	270,77 55	304,41 57	340,02 61	377,61 64
37	110,70 34	132,54 38	156,35 42	182,14 44	209,89 48	239,61 52	271,31 55	304,98 58	340,63 61	378,25 65
38	111,04 35	132,92 38	156,77 41	182,58 45	210,37 48	240,13 51	271,86 54	305,56 58	341,24 61	378,90 64
39	111,39 35	133,30 38	157,18 42	183,03 45	210,85 48	240,64 51	272,40 55	306,14 58	341,85 61	379,54 64
40	111,74 35	133,68 39	157,60 41	183,48 45	211,33 48	241,15 52	272,95 55	306,72 58	342,46 62	380,18 65
41	112,09 35	134,07 38	158,01 42	183,93 44	211,81 48	241,67 51	273,50 54	307,30 58	343,08 61	380,83 65
42	112,44 35	134,45 38	158,43 41	184,37 45	212,29 48	242,18 52	274,04 55	307,88 58	343,69 61	381,48 64
43	112,79 35	134,83 39	158,84 42	184,82 45	212,77 49	242,70 51	274,59 55	308,46 58	344,30 62	382,12 65
44	113,14 36	135,22 38	159,26 42	185,27 45	213,26 48	243,21 52	275,14 55	309,04 58	344,92 61	382,77 65
45	113,50 35	135,60 39	159,68 42	185,72 45	213,74 48	243,73 51	275,69 55	309,62 58	345,53 62	383,42 65
46	113,85 35	135,99 38	160,10 41	186,17 46	214,22 49	244,24 52	276,24 55	310,20 59	346,15 61	384,07 64
47	114,20 35	136,37 39	160,51 41	186,63 45	214,71 48	244,76 52	276,79 55	310,79 58	346,76 62	384,71 65
48	114,55 35	136,76 39	160,93 42	187,08 45	215,19 49	245,28 52	277,34 55	311,37 58	347,38 62	385,36 65
49	114,91 35	137,15 38	161,35 42	187,53 45	215,68 48	245,80 51	277,89 55	311,95 59	348,00 61	386,01 65
50	115,26 36	137,53 39	161,77 42	187,98 46	216,16 49	246,31 52	278,44 55	312,54 58	348,61 62	386,66 65
51	115,62 35	137,92 39	162,19 42	188,44 45	216,65 49	246,83 52	278,99 55	313,12 59	349,23 62	387,31 66
52	115,97 36	138,31 39	162,61 43	188,89 45	217,14 48	247,35 52	279,54 56	313,71 59	349,85 62	387,97 65
53	116,33 36	138,70 39	163,04 42	189,34 46	217,62 49	247,87 52	280,10 55	314,30 58	350,47 62	388,62 65
54	116,69 35	139,09 39	163,46 42	189,80 46	218,11 49	248,39 53	280,65 56	314,88 59	351,09 62	389,27 65
55	117,04 36	139,48 39	163,88 43	190,26 45	218,60 49	248,92 52	281,21 55	315,47 59	351,71 62	389,92 66
56	117,40 36	139,87 39	164,31 42	190,71 46	219,09 49	249,44 52	281,76 56	316,06 59	352,33 62	390,58 65
57	117,76 36	140,26 39	164,73 42	191,17 46	219,58 49	249,96 52	282,32 55	316,65 58	352,95 62	391,23 66
58	118,12 36	140,65 39	165,15 43	191,63 45	220,07 49	250,48 53	282,87 56	317,23 59	353,57 62	391,89 65
59	118,48 36	141,04 40	165,58 42	192,08 46	220,56 49	251,01 52	283,43 56	317,82 59	354,19 63	392,54 66
60	118,84	141,44	166,00	192,54	221,05	251,53	283,99	318,41	354,82	393,20

Tafel 2 $\frac{\operatorname{tg}^2 \frac{\Delta \alpha}{2}}{\sin 1''}$ (Fortsetzung)

$\Delta \alpha$	20 ^m	21 ^m	22 ^m	23 ^m	24 ^m	25 ^m	26 ^m	27 ^m	28 ^m	29 ^m
0 ^s	393,20 65	433,56 69	475,90 72	520,22 75	566,52 79	614,81 82	665,09 85	717,35 89	771,61 92	827,86 95
1	393,85 66	434,25 69	476,62 72	520,97 76	567,31 79	615,63 83	665,94 86	718,24 89	772,53 92	828,81 96
2	394,51 66	434,94 69	477,34 72	521,73 76	568,10 79	616,46 82	666,80 85	719,13 89	773,45 92	829,77 95
3	395,17 66	435,63 69	478,07 72	522,49 76	568,89 79	617,28 82	667,65 86	720,02 89	774,37 93	830,72 96
4	395,83 66	436,32 69	478,79 72	523,24 76	569,68 79	618,10 83	668,51 86	720,91 89	775,30 92	831,68 96
5	396,49 65	437,01 69	479,51 73	524,00 76	570,47 79	618,93 82	669,37 85	721,80 89	776,22 92	832,64 95
6	397,14 66	437,70 69	480,24 72	524,76 76	571,26 79	619,75 82	670,22 86	722,69 89	777,14 93	833,59 96
7	397,80 66	438,39 70	480,96 73	525,52 76	572,05 80	620,57 83	671,08 86	723,58 89	778,07 92	834,55 96
8	398,46 67	439,09 69	481,69 73	526,28 76	572,85 79	621,40 83	671,94 86	724,47 89	778,99 93	835,51 96
9	399,13 66	439,78 70	482,42 73	527,04 76	573,64 79	622,23 82	672,80 86	725,36 90	779,92 93	836,47 96
10	399,79 66	440,48 69	483,15 72	527,80 76	574,43 80	623,05 83	673,66 86	726,26 89	780,85 92	837,43 96
11	400,45 66	441,17 70	483,87 73	528,56 76	575,23 79	623,88 83	674,52 86	727,15 89	781,77 93	838,39 96
12	401,11 66	441,87 69	484,60 73	529,32 76	576,02 80	624,71 83	675,38 86	728,04 90	782,70 93	839,35 96
13	401,77 67	442,56 70	485,33 73	530,08 76	576,82 79	625,54 82	676,24 86	728,94 89	783,63 93	840,31 96
14	402,44 66	443,26 70	486,06 73	530,84 77	577,61 80	626,36 83	677,10 87	729,83 90	784,56 92	841,27 96
15	403,10 67	443,96 69	486,79 73	531,61 76	578,41 80	627,19 83	677,97 86	730,73 90	785,48 93	842,23 96
16	403,77 66	444,65 70	487,52 73	532,37 77	579,21 79	628,02 83	678,83 86	731,63 89	786,41 93	843,19 97
17	404,43 67	445,35 70	488,25 73	533,14 76	580,00 79	628,85 84	679,69 87	732,52 90	787,34 93	844,16 96
18	405,10 66	446,05 70	488,98 74	533,90 77	580,80 80	629,69 83	680,56 86	733,42 90	788,27 94	845,12 97
19	405,76 67	446,75 70	489,72 73	534,67 76	581,60 80	630,52 83	681,42 87	734,32 90	789,21 93	846,09 96
20	406,43 67	447,45 70	490,45 73	535,43 77	582,40 80	631,35 83	682,29 86	735,22 90	790,14 93	847,05 97
21	407,10 67	448,15 70	491,18 74	536,20 76	583,20 80	632,18 84	683,15 87	736,12 90	791,07 93	848,02 96
22	407,77 66	448,85 70	491,92 73	536,96 77	584,00 80	633,02 83	684,02 87	737,02 90	792,00 94	848,98 97
23	408,43 67	449,55 70	492,65 74	537,73 77	584,80 80	633,85 83	684,89 86	737,92 90	792,94 93	849,95 97
24	409,10 67	450,25 71	493,39 73	538,50 77	585,60 80	634,68 84	685,75 87	738,82 90	793,87 93	850,92 96
25	409,77 67	450,96 70	494,12 74	539,27 77	586,40 80	635,52 83	686,62 87	739,72 90	794,80 94	851,88 97
26	410,44 67	451,66 70	494,86 74	540,04 77	587,20 81	636,35 84	687,49 87	740,62 90	795,74 93	852,85 97
27	411,11 68	452,36 71	495,60 73	540,81 77	588,01 80	637,19 84	688,36 87	741,52 90	796,67 94	853,82 97
28	411,79 67	453,07 70	496,33 74	541,58 77	588,81 80	638,03 83	689,23 87	742,42 91	797,61 94	854,79 97
29	412,46 67	453,77 71	497,07 74	542,35 77	589,61 81	638,86 84	690,10 87	743,33 90	798,55 93	855,76 97

30	413,13 67	454,48 70	497,81 74	543,12 77	590,42 80	639,70 84	690,97 87	744,23 91	799,48 94	856,73 97
31	413,80 68	455,18 71	498,55 74	543,89 78	591,22 81	640,54 84	691,84 87	745,14 90	800,42 94	857,70 97
32	414,48 67	455,89 71	499,29 74	544,67 77	592,03 81	641,38 84	692,71 88	746,04 91	801,36 94	858,67 97
33	415,15 67	456,60 71	500,03 74	545,44 77	592,84 80	642,22 84	693,59 87	746,95 90	802,30 94	859,64 98
34	415,82 68	457,31 70	500,77 74	546,21 78	593,64 81	643,06 84	694,46 87	747,85 91	803,24 94	860,62 97
35	416,50 68	458,01 71	501,51 74	546,99 77	594,45 81	643,90 84	695,33 88	748,76 91	804,18 94	861,59 97
36	417,18 67	458,72 71	502,25 74	547,76 78	595,26 81	644,74 84	696,21 87	749,67 90	805,12 94	862,56 98
37	417,85 68	459,43 71	502,99 74	548,54 77	596,07 80	645,58 84	697,08 88	750,57 91	806,06 94	863,54 97
38	418,53 68	460,14 71	503,74 74	549,31 78	596,87 81	646,42 84	697,96 87	751,48 91	807,00 94	864,51 98
39	419,21 67	460,85 71	504,48 74	550,09 78	597,68 81	647,26 85	698,83 88	752,39 91	807,94 95	865,49 98
40	419,88 68	461,56 71	505,22 75	550,87 77	598,49 81	648,11 84	699,71 88	753,30 91	808,89 94	866,47 97
41	420,56 68	462,27 72	505,97 74	551,64 78	599,30 82	648,95 85	700,59 87	754,21 91	809,83 94	867,44 98
42	421,24 68	462,99 71	506,71 75	552,42 78	600,12 81	649,80 84	701,46 88	755,12 91	810,77 95	868,42 98
43	421,92 68	463,70 71	507,46 74	553,20 78	600,93 81	650,64 85	702,34 88	756,03 92	811,72 94	869,40 97
44	422,60 68	464,41 72	508,20 75	553,98 78	601,74 81	651,49 84	703,22 88	756,95 91	812,66 95	870,37 98
45	423,28 68	465,13 71	508,95 75	554,76 78	602,55 82	652,33 85	704,10 88	757,86 91	813,61 94	871,35 98
46	423,96 68	465,84 71	509,70 75	555,54 78	603,37 81	653,18 85	704,98 88	758,77 91	814,55 95	872,33 98
47	424,64 69	466,55 72	510,45 74	556,32 78	604,18 81	654,03 84	705,86 88	759,68 92	815,50 95	873,31 98
48	425,33 68	467,27 72	511,19 75	557,10 78	604,99 82	654,87 85	706,74 88	760,60 91	816,45 95	874,29 98
49	426,01 68	467,99 71	511,94 75	557,88 79	605,81 82	655,72 85	707,62 88	761,51 92	817,40 94	875,27 99
50	426,69 69	468,70 72	512,69 75	558,67 78	606,63 81	656,57 85	708,50 89	762,43 91	818,34 95	876,26 98
51	427,38 68	469,42 72	513,44 75	559,45 78	607,44 82	657,42 85	709,39 88	763,34 92	819,29 95	877,24 98
52	428,06 69	470,14 71	514,19 75	560,23 79	608,26 82	658,27 85	710,27 88	764,26 92	820,24 95	878,22 98
53	428,75 68	470,85 72	514,94 76	561,02 78	609,08 81	659,12 85	711,15 89	765,18 91	821,19 95	879,20 99
54	429,43 69	471,57 72	515,70 75	561,80 79	609,89 82	659,97 85	712,04 88	766,09 92	822,14 95	880,19 98
55	430,12 69	472,29 72	516,45 75	562,59 78	610,71 82	660,82 85	712,92 89	767,01 92	823,09 96	881,17 99
56	430,81 68	473,01 72	517,20 75	563,37 79	611,53 82	661,67 86	713,81 88	767,93 92	824,05 95	882,16 98
57	431,49 69	473,73 72	517,95 76	564,16 79	612,35 82	662,53 85	714,69 89	768,85 92	825,00 95	883,14 98
58	432,18 69	474,45 72	518,71 75	564,95 78	613,17 82	663,38 85	715,58 89	769,77 92	825,95 95	884,13 99
59	432,87 69	475,17 73	519,46 76	565,73 79	613,99 82	664,23 86	716,47 88	770,69 92	826,90 96	885,11 99
60	433,56	475,90	520,22	566,52	614,81	665,09	717,35	771,61	827,86	886,40

Über die Genauigkeit der Rechnung nach den Formeln (III) und (III') ist folgendes zu bemerken

1 Genaherte Rechnung bei Plattenfeldern bis $10^\circ \times 10^\circ$ Da die vernachlässigten Glieder 4 und höherer Ordnung in diesem Falle bei $\mathfrak{D} = 60^\circ$ maximal rund $0,5$ (in Bogen gr Kr) erreichen, so brauchen alle Rechnungen nur bis auf ganze Zehner von Bogensekunden bzw ganze Zeitsekunden geführt

Tafel 3			Tafel 4					
$\Delta\alpha$	$\frac{1}{2} \operatorname{tg}^4 \frac{\Delta\alpha}{2}$	$\frac{1}{2} \sin 1''$	δ	d	$\sin 4\delta$	δ	d	
0^m	$0,00$	0	45°	0°	$+0,00$	$7-$	45°	90°
1	$,00$	0	44	1	$0,07$	7	46	89
2	$,00$	0	43	2	$0,14$	7	47	88
3	$,00$	0	42	3	$0,21$	7	48	87
4	$,00$	0	41	4	$0,28$	7	49	86
5	$0,00$	0	40	5	$+0,34$	$6-$	50	85
6	$,00$	1	39	6	$0,41$	6	51	84
7	$,01$	0	38	7	$0,47$	6	52	83
8	$,01$	0	37	8	$0,53$	6	53	82
9	$,02$	1	36	9	$0,59$	5	54	81
10	$0,02$	1	35	10	$+0,64$	$5-$	55	80
11	$,03$	2	34	11	$0,69$	5	56	79
12	$,05$	2	33	12	$0,74$	5	57	78
13	$,07$	2	32	13	$0,79$	4	58	77
14	$,09$	3	31	14	$0,83$	4	59	76
15	$0,12$	3	30	15	$+0,87$	$3-$	60	75
16	$,15$	5	29	16	$0,90$	3	61	74
17	$,20$	5	28	17	$0,93$	2	62	73
18	$,25$	5	27	18	$0,95$	2	63	72
19	$,30$	7	26	19	$0,97$	1	64	71
20	$0,37$	9	25	20	$+0,98$	$1-$	65	70
21	$,46$	9	24	21	$0,99$	1	66	69
22	$,55$	11	23	22	$1,00$	0	67	68
23	$,66$	12	22	23	$1,00$	0	68	67
24	$,78$	14	21	24	$0,99$	1	69	66
25	$0,92$	15	20	25	$+0,98$	$1-$	70	65
26	$1,07$	18						
27	$,25$	19						
28	$,44$	22						
29	$,66$	24						
30	$1,90$	24						

zu werden, wozu die in den Tafeln gegebene Stellenzahl der Koeffizienten ausreicht Analoges gilt für τ und τ' , hier macht jedoch der mit dem Faktor $\frac{1}{\tau} \sec^3 \mathfrak{D}$ zu multiplizierende Wert $\tau(X'')$ in (III') eine Ausnahme Soll die Zeitsekunde rechnerisch gesichert sein, so muß in höheren Deklinationen $\tau(X'')$ auf $1''$ angesetzt werden Bei geringeren Ansprüchen an Rechenscharfe genügt entsprechend rohere Näherung, $\tau(Y'')$ und $\tau'(\Delta\delta'')$ können dann, da maximal nur $46''$ erreichend, fortfallen Der Gesamtfehler der Formeln steigt hierdurch bei $\mathfrak{D} = 60^\circ$ in den Ecken einer $10^\circ \times 10^\circ$ -Platte auf etwa $1,5$ (in Bogen gr Kr)

2 Scharfe Rechnung bei Plattenfeldern bis $1^\circ \times 1^\circ$ Die höheren Glieder bleiben für $\mathfrak{D} \leq 60^\circ$ unter $0'',01$ bzw $0^s,001$ Wenn die Koeffizienten a_1, a_2, d_2 und $\sec^2 \mathfrak{D}$ auf die in den Tafeln 5 und 6 angegebenen Stellenzahlen angesetzt werden, so gilt dieselbe Grenze auch für die reine Rechenunsicherheit mit Ausnahme der ersten der Gleichungen (III'), wo in den Ecken eines Plattenfeldes von $1^\circ \times 1^\circ$ ein Fehler von $0^s,003$ auftreten kann Er ruht von dem Glied $a_1 \frac{X''}{1000} \frac{Y''}{1000}$ her und ist zu vermeiden, indem a_1 aus seiner Definitionsgleichung

$$a_1 = + \frac{1}{15} 10^6 \sin 1'' \sec \mathfrak{D} \operatorname{tg} \mathfrak{D} = +0,32321 \sec \mathfrak{D} \operatorname{tg} \mathfrak{D}$$

auf $0,0001$ berechnet wird

Ferner ist zu beachten, daß $\tau'(\Delta\delta'')$ und $\tau(Y'')$ auf $0'',01$, $\tau(X'')$ in höheren Deklinationen auf $0'',001$ anzusetzen sind, um die angegebene Rechenscharfe zu gewährleisten Dementsprechend gibt Tafel 1 bis zu $30'$ die Werte τ dreistellig

Wenn die Glieder 3. Ordnung zu vernachlässigen sind, empfiehlt es sich, in die Reihen für X und $\Delta\alpha$ in den ersten Gliedern statt \mathfrak{D} die Deklination δ des

Tafel 5

\mathfrak{D}	a_1	b_1	a_1	d_1	\mathfrak{D}	a_1	b_1	a_1	d_1
0,0	-0,000	+0,000	+0,000	-0,000	30,0	-3,636	+2,362	+0,216	-1,400
0,5	,063	,048	,003	,021	30,5	,691	,385	,221	,428
1,0	,127	,095	,006	,042	31,0	,745	,408	,227	,457
1,5	,190	,143	,008	,063	31,5	,800	,430	,232	,485
2,0	,254	,190	,011	,085	32,0	,854	,451	,238	,515
2,5	-0,317	+0,238	+0,014	-0,106	32,5	-3,907	+2,472	+0,244	-1,544
3,0	,381	,285	,017	,127	33,0	-3,961	,54	,491	,250
3,5	,444	,332	,020	,148	33,5	-4,014	,53	,510	,257
4,0	,507	,380	,023	,170	34,0	,067	,528	,263	,635
4,5	,571	,427	,026	,191	34,5	,119	,52	,270	,666
5,0	-0,634	+0,474	+0,028	-0,212	35,0	-4,171	+2,563	+0,276	-1,697
5,5	,697	,520	,031	,233	35,5	,223	,579	,283	,729
6,0	,760	,567	,034	,255	36,0	,275	,594	,290	,761
6,5	,823	,613	,037	,276	36,5	,326	,608	,298	,794
7,0	,886	,660	,040	,298	37,0	,377	,621	,305	,827
7,5	-0,949	+0,706	+0,043	-0,319	37,5	-4,427	+2,634	+0,313	-1,860
8,0	-1,012	,752	,046	,341	38,0	,477	,646	,320	,894
8,5	,075	,797	,049	,362	38,5	,527	,657	,329	,928
9,0	,138	,843	,052	,384	39,0	,577	,667	,337	,963
9,5	,200	,888	,055	,406	39,5	,626	,677	,345	-1,998
10,0	-1,263	+0,933	+0,058	-0,427	40,0	-4,674	+2,686	+0,354	-2,034
10,5	,325	+0,977	,061	,449	40,5	,723	,694	,363	,070
11,0	,388	+1,022	,064	,471	41,0	,771	,701	,372	,107
11,5	,450	,066	,067	,493	41,5	,819	,707	,382	,145
12,0	,512	,109	,070	,515	42,0	,866	,712	,392	,183
12,5	-1,574	+1,153	+0,073	-0,537	42,5	-4,913	+2,717	+0,402	-2,221
13,0	,636	,195	,077	,560	43,0	-4,960	,720	,412	,260
13,5	,698	,238	,080	,582	43,5	-5,006	,723	,423	,300
14,0	,759	,280	,083	,604	44,0	,052	,725	,434	,341
14,5	,821	,322	,086	,627	44,5	,097	,727	,445	,382
15,0	-1,882	+1,364	+0,089	-0,650	45,0	-5,142	+2,727	+0,457	-2,424
15,5	-1,943	,405	,093	,672	45,5	,187	,727	,469	,467
16,0	-2,004	,445	,096	,695	46,0	,231	,725	,482	,510
16,5	,065	,485	,100	,718	46,5	,275	,723	,495	,554
17,0	,126	,525	,103	,741	47,0	,319	,720	,508	,599
17,5	-2,187	+1,564	+0,107	-0,764	47,5	-5,362	+2,717	+0,522	-2,645
18,0	,247	,603	,110	,788	48,0	,404	,712	,536	,692
18,5	,307	,641	,114	,811	48,5	,447	,707	,551	,740
19,0	,368	,679	,118	,835	49,0	,488	,701	,567	,789
19,5	,428	,716	,121	,858	49,5	,530	,694	,583	,838
20,0	-2,487	+1,753	+0,125	-0,882	50,0	-5,571	+2,686	+0,599	-2,889
20,5	,547	,789	,129	,906	50,5	,611	,677	,616	,941
21,0	,606	,825	,133	,931	51,0	,652	,667	,634	-2,993
21,5	,665	,860	,137	,955	51,5	,691	,657	,653	-3,047
22,0	,724	,894	,141	-0,979	52,0	,731	,646	,672	,103
22,5	-2,783	+1,928	+0,145	-1,004	52,5	-5,769	+2,634	+0,692	-3,159
23,0	,841	,962	,149	,029	53,0	,808	,621	,713	,217
23,5	,900	,1,994	,153	,054	53,5	,846	,608	,734	,276
24,0	-2,958	+2,027	,158	,079	54,0	,883	,594	,757	,336
24,5	-3,016	,058	,162	,105	54,5	,920	,579	,780	,398
25,0	-3,073	+2,089	+0,166	-1,130	55,0	-5,957	+2,563	+0,805	-3,462
25,5	,131	,119	,171	,156	55,5	-5,993	,546	,830	,527
26,0	,188	,149	,175	,182	56,0	-6,029	,528	,857	,594
26,5	,245	,178	,180	,209	56,5	,064	,510	,885	,662
27,0	,302	,206	,185	,235	57,0	,099	,491	,914	,733
27,5	-3,358	+2,234	+0,190	-1,262	57,5	-6,133	+2,472	+0,944	-3,805
28,0	,414	,261	,195	,289	58,0	,167	,451	,976	,879
28,5	,470	,287	,200	,316	58,5	,201	,430	,1,009	-3,956
29,0	,526	,313	,205	,344	59,0	,234	,408	,1,044	-4,034
29,5	,581	,338	,210	,372	59,5	,266	,385	,081	,115
30,0	-3,636	+2,362	+0,216	-1,400	60,0	-6,298	+2,362	+1,120	-4,199

Bei negativem \mathfrak{D} kehren sich alle Vorzeichen um

Tafel 6

\mathfrak{D}	a_2	b_2	a_2	\bar{a}_2	$\sec^2 \mathfrak{D}$
0°	+0,0264 0	+0,0264 0	+0,0000 0	-0,0118 0	+1,00 0
1	,0264 0	,0264 0	,0000 0	,0118 0	,00 0
2	,0264 1	,0264 1	,0000 0	,0118 0	,00 0
3	,0263 1	,0263 1	,0000 0	,0118 0	,00 0
4	,0262 1	,0262 1	,0000 0	,0118 0	,00 0
5	+0,0260 2	+0,0260 2	+0,0000 0	-0,0118 0	+1,01 1
6	,0259 1	,0259 1	,0000 0	,0119 1	,01 0
7	,0257 2	,0257 2	,0000 0	,0119 0	,02 1
8	,0254 3	,0254 3	,0000 0	,0119 0	,02 0
9	,0252 2	,0251 3	,0000 0	,0120 1	,02 1
10	+0,0249 3	+0,0248 3	+0,0000 0	-0,0121 1	+1,03 0
11	,0245 4	,0245 3	,0001 1	,0122 1	,04 1
12	,0242 3	,0242 3	,0001 0	,0123 1	,05 1
13	,0238 4	,0238 4	,0001 0	,0124 1	,05 0
14	,0234 4	,0233 5	,0001 0	,0125 1	,06 1
15	+0,0230 4	+0,0229 4	+0,0001 0	-0,0126 1	+1,07 1
16	,0225 5	,0224 5	,0001 1	,0127 2	,08 1
17	,0220 5	,0219 5	,0002 0	,0129 1	,09 2
18	,0215 5	,0214 5	,0002 0	,0130 1	,11 1
19	,0210 5	,0208 5	,0002 0	,0131 2	,12 1
20	+0,0205 5	+0,0203 5	+0,0002 0	-0,0133 2	+1,13 2
21	,0199 6	,0197 7	,0002 1	,0135 2	,15 1
22	,0194 6	,0190 6	,0003 0	,0137 2	,16 2
23	,0188 6	,0184 7	,0003 0	,0139 2	,18 2
24	,0182 6	,0177 7	,0003 0	,0141 2	,20 2
25	+0,0175 7	+0,0170 7	+0,0004 1	-0,0143 2	+1,22 2
26	,0169 6	,0163 8	,0004 1	,0145 3	,24 2
27	,0163 6	,0155 8	,0005 1	,0148 3	,26 2
28	,0156 6	,0148 8	,0005 1	,0151 3	,28 3
29	,0150 7	,0140 8	,0006 0	,0154 3	,31 2
30	+0,0143 7	+0,0132 8	+0,0006 1	-0,0157 3	+1,33 3
31	,0136 6	,0124 8	,0007 0	,0160 3	,36 3
32	,0130 6	,0116 8	,0007 1	,0163 4	,39 3
33	,0123 7	,0108 9	,0008 1	,0167 4	,42 3
34	,0116 6	,0099 9	,0009 0	,0171 4	,45 4
35	+0,0110 7	+0,0090 9	+0,0009 1	-0,0175 5	+1,49 4
36	,0103 7	,0082 9	,0010 1	,0180 4	,53 4
37	,0096 7	,0073 9	,0011 0	,0184 5	,57 4
38	,0090 6	,0064 9	,0012 1	,0189 6	,61 5
39	,0083 7	,0055 9	,0013 1	,0195 5	,66 4
40	+0,0077 6	+0,0046 9	+0,0014 2	-0,0200 6	+1,70 6
41	,0071 6	,0037 9	,0016 1	,0206 7	,76 5
42	,0065 6	,0028 10	,0017 2	,0213 7	,81 6
43	,0059 6	,0018 9	,0019 1	,0220 7	,87 6
44	,0053 6	+0,0009 9	,0020 2	,0227 8	+1,93 7
45	+0,0047 6	0,0000 9	+0,0022 2	-0,0235 9	+2,00 7
46	,0041 5	-0,0009 9	,0024 2	,0244 9	,07 8
47	,0036 6	,0018 10	,0026 3	,0253 9	,15 8
48	,0030 5	,0028 9	,0029 3	,0262 11	,23 9
49	,0025 5	,0037 9	,0032 3	,0273 11	,32 10
50	+0,0020 4	-0,0046 9	+0,0035 3	-0,0284 13	+2,42 10
51	,0016 5	,0055 9	,0038 4	,0297 13	,52 12
52	,0011 4	,0064 9	,0042 4	,0310 14	,64 12
53	,0007 4	,0073 9	,0046 4	,0324 16	,76 13
54	+0,0003 4	,0082 8	,0051 5	,0340 17	+2,89 15
55	-0,0001 4	-0,0090 9	+0,0056 6	-0,0357 19	+3,04 16
56	,0005 3	,0099 9	,0062 6	,0376 20	,20 17
57	,0008 3	,0108 8	,0068 8	,0396 22	,37 19
58	,0011 3	,0116 8	,0076 9	,0418 25	,56 21
59	,0014 3	,0124 8	,0085 9	,0443 27	+3,77 23
60	-0,0017 3	-0,0132 8	+0,0094 9	-0,0470 27	+4,00 23

Bei negativem \mathfrak{D} bleiben alle Vorzeichen erhalten

Sterns einzuführen, weil hierdurch die Glieder 2. Ordnung in diesen Formeln überhaupt entfallen (III) und (III') gehen damit über in

$$\left. \begin{aligned} X'' &= 15 \cos \delta \Delta \alpha^s, \\ Y'' &= \Delta \delta'' + b_1 \left(\frac{\Delta \alpha^s}{100} \right)^2, \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV})$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \alpha^s &= \frac{1}{15} \sec \delta X'', \\ \Delta \delta'' &= Y'' + d_1 \left(\frac{X''}{1000} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV}')$$

In dieser Form sind die Reihenentwicklungen sehr bequem und auch noch für viele Zwecke ausreichend. Um den Grad der Annäherung zu beurteilen, kann man für einen Stern in der äußersten Plattenecke entweder die Rechnung nach den strengen Formeln durchführen oder die vernachlässigten Glieder 3. Ordnung berechnen. Im letzteren Falle ist aber zu beachten, daß sich diese Glieder durch die Einführung von δ statt \mathfrak{D} in den Reihen für X und $\Delta \alpha$ gegenüber (III) und (III') ändern. Die Glieder 3. Ordnung lauten jetzt

in der Reihe für X

$$+ 0,01763 \cos \mathfrak{D} \frac{\Delta \alpha^s}{100} \left(\frac{\Delta \delta''}{1000} \right)^2 + a_2 \left(\frac{\Delta \alpha^s}{100} \right)^3,$$

in der Reihe für $\Delta \alpha$

$$- 0,00078 \sec \mathfrak{D} \frac{X''}{1000} \left(\frac{Y''}{1000} \right)^2 + 0,00026 \sec \mathfrak{D} (\sec^2 \mathfrak{D} - 3) \left(\frac{X''}{1000} \right)^3$$

Die Einheiten sind dieselben wie vorher, die Glieder der Reihe für X erscheinen also in Bogensekunden, die der Reihe für $\Delta \alpha$ in Zeitsekunden ausgedrückt. In den Reihen für Y und $\Delta \delta$ bleiben selbstverständlich alle Glieder unverändert.

Verzeichnis weiterer Hilfstafeln zur Transformation von X, Y in α, δ und umgekehrt

HINKS, Mem. R. A. S. 57, S. 147

HNAIEK, A. N. 181, S. 133 (1909), Zusatz hierzu A. N. 183, S. 89 (1909)

JACOBY, Columbia Contr. Nr. 23 (1905)

LAGARDE, Bull. Carte du Ciel V, C. 1, Neue Ausgabe J. O. 11, S. 17

PFLERS, Veröff. d. Astr. Recheninst. Berlin-Dahlem Nr. 47 (1929)

SCHORR, Hilfstafeln d. Hamb. Sternwarte, Abschn. G (1924), Tafel 101, 102

Vorstehende Tafeln mit Ausnahme der PETERSschen sind vorzugsweise zur Reduktion der an Himmelskartenrefraktoren aufgenommenen Platten bestimmt, jedoch für beliebige \mathfrak{D} brauchbar. Tafeln, welche ausschließlich für spezielle Werte von \mathfrak{D} eingerichtet sind, finden sich in den Einleitungen und Anhängen zu zahlreichen Bänden des Katalogs der photographischen Himmelskarte.

Anhang II Photographische Refraktionstafeln

Erläuterungen.

Die Tafeln beruhen auf der GYLDÉN'schen Theorie und der BAUSCHINGERSchen Konstante ($60'',15$) der Refraktion. Als Umrechnungsfaktor der visuellen Refraktion auf die photographische wurde angenommen $n = 1,0155$, übereinstimmend mit den Tafeln des Verfassers in A. N. 236, S. 81 (1929). Von dort sind unverändert übernommen die vorliegenden Tafeln 8, 9, 10, 11 und 16. In der Form verändert und durch die Werte λ ergänzt ist Tafel 7 neu gerechnet.

wurden auf Grund der Werte von ALBRECHT¹ die Tafeln 13, 14 und 15 sowie nach LANDOLT-BORNSTEIN² die Tafel 12

Zur zahlenmäßigen Berechnung der Refraktion wird der Koeffizient β meist in Verbindung mit den Faktoren $\sin 1''$ und $\sin^2 1''$ gebraucht. Dementsprechend führen die Tafeln unmittelbar zu den Werten $\mathfrak{B} = \beta \sin 1''$ und $\mathfrak{b} = \beta \sin^2 1''$. Setzt man weiter $\mathfrak{B}_0 = \beta_0 \sin 1''$ und $\mathfrak{b}_0 = \beta_0 \sin^2 1''$, wo β_0 den auf mittleren atmosphärischen Zustand bezogenen Wert von β bezeichnet, so gelten die bekannten Gleichungen

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{B}_0 B T \gamma^\lambda,$$

$$\mathfrak{b} = \mathfrak{b}_0 B T \gamma^\lambda,$$

worin B vom Barometerstand, T von der Temperatur des Quecksilbers im Barometer, γ von der Lufttemperatur und λ von der Zenitdistanz abhängt.

Zur Auswertung dieser Formeln bieten die Refraktionstafeln folgende Wege, die sich durch die Art und die Genauigkeit der Rechnung unterscheiden.

A Vierstellige logarithmische Rechnung (Genauigkeit etwa 2×10^{-4}) Tafeln 7, 9, 10, 11

$$\log \mathfrak{B} = \log \mathfrak{B}_0 + \log B + \log T + \lambda \log \gamma,$$

$$\log \mathfrak{b} = \log \mathfrak{B} + \log \sin 1'' \quad [\log \sin 1'' = 4,6856 - 10]$$

B Numerische Rechnung (Genauigkeit etwa 10^{-3}) Tafeln 7, 8, 12, 13, 14, 15

Wird als Argument zur Entnahme der vom Barometerstand abhängigen Größe der nach Tafel 12 auf 0° reduzierte Barometerstand benutzt, so entfällt der Faktor T . Da auch der Einfluß von λ innerhalb der Genauigkeitsgrenze von 10^{-3} verschwindet, so gilt

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{B}_0 B \gamma,$$

$$\mathfrak{b} = \mathfrak{b}_0 B \gamma$$

Wird nun gesetzt

$$\sigma_1 = B - 1,$$

$$\sigma_2 = \gamma - 1,$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 \sigma_2,$$

so ergeben sich \mathfrak{B} und \mathfrak{b} aus

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3,$$

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{B}_0 + \sigma \mathfrak{B}_0,$$

$$\mathfrak{b} = \mathfrak{b}_0 + \sigma \mathfrak{b}_0$$

C Genaherte Rechnung (Genauigkeit etwa 10^{-2}) Tafeln 7, 8, 16

Innerhalb der Genauigkeitsgrenze von 10^{-2} ist der Einfluß der Temperatur auf den Barometerstand verschwindend. In diesem Falle kann σ unmittelbar aus Tafel 16 entnommen werden, und man rechnet wie unter B nach den Formeln

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{B}_0 + \sigma \mathfrak{B}_0,$$

$$\mathfrak{b} = \mathfrak{b}_0 + \sigma \mathfrak{b}_0$$

Zur Berechnung der Refraktionsglieder mit β' definiert man analog eine Größe $\mathfrak{B}' = \beta' \sin 1''$ und hat folgende Zahlenwerte einzusetzen

$$\beta' = -0'',087,$$

$$\mathfrak{B}' = -0,420 \times 10^{-6}$$

Die meteorologischen Daten können hier, falls ausnahmsweise erforderlich, in analoger Weise wie oben bei den Koeffizienten \mathfrak{B} und \mathfrak{b} berücksichtigt werden, es genügt stets die genaherte Rechnung nach C.

¹ ALBRECHT, Formeln und Hilfstafeln für geographische Ortsbestimmungen, 4 Aufl (1908), Tafeln 31f, 31g

² LANDOLT-BORNSTEIN, Phys-chem Tabellen, 5 Aufl (1923), Tab 18, 19

Tafel 7 \mathfrak{B}_0 , $\log \mathfrak{B}_0$, λ Argument ζ = wahre Zenitdistanz

ζ	$\log \mathfrak{B}_0$	$10^4 \mathfrak{B}_0$	λ
0°	6,4516	2,829	
10	516	,829	
20	515	,828	
30	514	,827	
35	6,4513	2,827	
40	512	,826	
45	510	,825	1,002
50	507	,823	,002
55	503	,821	,003
60	6,4497	2,817	1,004
61	496	,816	,005
62	494	,814	,005
63	492	,813	,006
64	490	,812	,006
65	6,4488	2,810	1,006
66	485	,809	,007
67	482	,807	,008
68	478	,804	,009
69	474	,802	,009
70	6,4470	2,799	1,010

Tafel 8 \mathfrak{B}_0 Argumente ζ = wahre Zenitdistanz und $\operatorname{tg} \zeta$

ζ	$\operatorname{tg} \zeta$	$10^8 \mathfrak{B}_0$
0°, 0	0,00	0,1371
34, 0	0,67	0,1370
44, 5	0,98	0,1369
50, 5	1,21	0,1368
54, 7	1,41	0,1367
57, 7	1,58	0,1366
60, 2	1,74	0,1365
62, 0	1,88	0,1364
63, 6	2,01	0,1363
65, 0	2,14	0,1362
66, 2	2,26	0,1361
67, 2	2,38	0,1360
68, 1	2,49	0,1359
68, 9	2,59	0,1358
69, 6	2,69	0,1357
70, 2	2,78	

Tafel 9 $\log B$ Argument b = Barometerstand in mm Einheit 0,0001

b	$\log B$	b	$\log B$	b	$\log B$	b	$\log B$	b	$\log B$	b	$\log B$
mm		mm		mm		mm		mm		mm	
600	-978 ^{IV}	630	-766 ^{IV}	660	-564 ^{IV}	690	-371 ^{IV}	720	-186 ^{IV}	750	-9 ^{IV}
01	971	31	759	61	557	91	365	21	180	51	-3
02	963	32	752	62	551	92	358	22	174	52	+3
03	956	33	745	63	544	93	352	23	168	53	9
04	949	34	738	64	538	94	346	24	162	54	14
605	-942	635	-732	665	-531	695	-339	725	-156	755	+20
06	935	36	725	66	525	96	333	26	150	56	26
07	927	37	718	67	518	97	327	27	144	57	32
08	920	38	711	68	512	98	321	28	138	58	37
09	913	39	704	69	505	99	315	29	132	59	43
610	-906	640	-698	670	-499	700	-308	730	-126	760	+49
11	899	41	691	71	492	01	302	31	120	61	54
12	892	42	684	72	486	02	296	32	114	62	60
13	885	43	677	73	479	03	290	33	108	63	66
14	878	44	670	74	473	04	284	34	102	64	72
615	-871	645	-664	675	-466	705	-277	735	-97	765	+77
16	864	46	657	76	460	06	271	36	91	66	83
17	856	47	650	77	454	07	265	37	85	67	89
18	849	48	643	78	447	08	259	38	79	68	94
19	842	49	637	79	441	09	253	39	73	69	100
620	-835	650	-630	680	-434	710	-247	740	-67	770	+106
21	828	51	624	81	428	11	241	41	61	71	111
22	821	52	617	82	422	12	234	42	55	72	117
23	814	53	610	83	415	13	228	43	49	73	123
24	807	54	603	84	409	14	222	44	44	74	128
625	-800	655	-597	685	-402	715	-216	745	-38	775	+134
26	794	56	590	86	396	16	210	46	32	76	139
27	787	57	584	87	390	17	204	47	26	77	145
28	780	58	577	88	383	18	198	48	20	78	150
29	773	59	570	89	377	19	192	49	15	79	156
630	-766	660	-564	690	-371	720	-186	750	-9	780	+162

Tafel 10 $\log T$ Argument (t) = Quecksilbertemperatur
in Celsiusgraden Einheit 0,0001

(t)	$\log T$	(t)	$\log T$
-20°	+14 ^{IV}	+ 5°	- 3 ^{IV}
15	10	10	7
10	7	15	10
- 5	+ 3	20	14
0	0	25	17
		+30	-21

Tafel 12 Reduktion des Barometerstandes auf 0°

Argumente b = Barometerstand in mm,
 (t) = Quecksilbertemperatur in Celsiusgraden

(t)	b	600	650	700	750	800
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
$\pm 0^\circ$	$\mp 0,0$	$\mp 0,0$	$\mp 0,0$	$\mp 0,0$	$\mp 0,0$	$\mp 0,0$
5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	
10	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	
± 15	$\mp 1,5$	$\mp 1,6$	$\mp 1,7$	$\mp 1,8$	$\mp 2,0$	
20	2,0	2,1	2,3	2,4	2,6	
25	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	
± 30	$\mp 2,9$	$\mp 3,2$	$\mp 3,4$	$\mp 3,7$	$\mp 3,9$	

Tafel 11 $\log \gamma$ Argument t = Lufttemperatur
in Celsiusgraden Einheit 0,0001

t	$\log \gamma$	t	$\log \gamma$
-20°	+480 ^{IV}	+ 5°	+ 67 ^{IV}
19	462 18	6	52 15
18	445 17	7	36 16
17	428 17	8	20 16
16	411 17	9	+ 5 15
-15	+394 17	+10	- 11 16
14	377 17	11	26 15
13	360 17	12	42 16
12	343 17	13	57 15
11	326 17	14	72 15
-10	+310 16	+15	- 87 15
9	293 17	16	102 15
8	277 17	17	118 16
7	260 17	18	133 15
6	244 16	19	148 15
- 5	+228 16	+20	-163 15
4	211 17	21	178 15
3	195 16	22	192 14
2	179 16	23	207 15
- 1	163 16	24	222 15
0	+147 16	+25	-237 15
+ 1	131 16	26	251 14
2	115 16	27	266 15
3	99 16	28	280 14
4	83 16	29	295 15
+ 5	+ 67 16	+30	-309 14

Tafel 13 σ_1 Argument b_0 = Barometerstand in mm, auf 0° reduziert

b_0	σ_1	b_0	σ_1	b_0	σ_1	b_0	σ_1	b_0	σ_1	b_0	σ_1
mm		mm		mm		mm		mm		mm	
600	-0,202	630	-0,162	660	-0,122	690	-0,082	720	-0,042	750	-0,002
01	,200	31	,160	61	,120	91	,081	21	,041	51	-0,001
02	,199	32	,159	62	,119	92	,079	22	,039	52	+0,001
03	,198	33	,158	63	,118	93	,078	23	,038	53	,002
04	,196	34	,156	64	,116	94	,077	24	,037	54	,003
605	-0,195	635	-0,155	665	-0,115	695	-0,075	725	-0,035	755	+0,005
06	,194	36	,154	66	,114	96	,074	26	,034	56	,006
07	,192	37	,152	67	,112	97	,073	27	,033	57	,007
08	,191	38	,151	68	,111	98	,071	28	,031	58	,009
09	,190	39	,150	69	,110	99	,070	29	,030	59	,010
610	-0,188	640	-0,148	670	-0,108	700	-0,069	730	-0,029	760	+0,011
11	,187	41	,147	71	,107	01	,067	31	,027	61	,013
12	,186	42	,146	72	,106	02	,066	32	,026	62	,014
13	,184	43	,144	73	,104	03	,065	33	,025	63	,015
14	,183	44	,143	74	,103	04	,063	34	,023	64	,017
615	-0,182	645	-0,142	675	-0,102	705	-0,062	735	-0,022	765	+0,018
16	,180	46	,140	76	,100	06	,061	36	,021	66	,019
17	,179	47	,139	77	,099	07	,059	37	,019	67	,021
18	,178	48	,138	78	,098	08	,058	38	,018	68	,022
19	,176	49	,136	79	,096	09	,057	39	,017	69	,023
620	-0,175	650	-0,135	680	-0,095	710	-0,055	740	-0,015	770	+0,025
21	,174	51	,134	81	,094	11	,054	41	,014	71	,026
22	,172	52	,132	82	,092	12	,053	42	,013	72	,027
23	,171	53	,131	83	,091	13	,051	43	,011	73	,029
24	,170	54	,130	84	,090	14	,050	44	,010	74	,030
625	-0,168	655	-0,128	685	-0,088	715	-0,049	745	-0,009	775	+0,031
26	,167	56	,127	86	,087	16	,047	46	,007	76	,033
27	,166	57	,126	87	,086	17	,046	47	,006	77	,034
28	,164	58	,124	88	,085	18	,045	48	,005	78	,035
29	,163	59	,123	89	,083	19	,043	49	,003	79	,037
630	-0,162	660	-0,122	690	-0,082	720	-0,042	750	-0,002	780	+0,038

Tafel 14 σ_2 Argument t = Lufttemperatur in Celsiusgraden

t	σ_2	t	σ_2	t	σ_2	t	σ_2
-20°	+0,117	-7°	+0,062	+5°	+0,016	+18°	+0,030
19	,112	6	,058	6	,012	19	,033
18	,108	-5	+0,054	7	,008	+20	-0,037
17	,104	4	,050	8	,005	21	,040
16	,099	3	,046	9	+0,001	22	,043
-15	+0,095	2	,042	+10	-0,002	23	,047
14	,091	-1	,038	11	,006	24	,050
13	,086	0	+0,034	12	,010	+25	-0,053
12	,082	+1	,031	13	,013	26	,056
11	,078	2	,027	14	,016	27	,059
-10	+0,074	3	,023	+15	-0,020	28	,063
9	,070	4	,019	16	,023	29	,066
-8	+0,066	+5	+0,016	+17	-0,027	+30	-0,069

Tafel 15 σ_3 Argumente b_0 = Barometerstand in mm, auf 0° reduziert, t = Lufttemperatur in Celsiusgraden

b_0	-20°	-15°	-10°	-5°	0°	+5°	+10°	+15°	+20°	+25°	+30°
mm											
600	-0,023	-0,019	-0,015	-0,011	-0,007	-0,003	+0,001	+0,004	+0,007	+0,011	+0,014
10	,022	,018	,014	,010	,006	,003	0,000	,004	,007	,010	,013
20	,020	,017	,013	,009	,006	,003	,000	,003	,006	,009	,012
30	,019	,015	,012	,009	,006	,003	,000	,003	,006	,009	,011
40	,017	,014	,011	,008	,005	,002	,000	,003	,005	,008	,010
650	-0,016	-0,013	-0,010	-0,007	-0,005	-0,002	0,000	+0,003	+0,005	+0,007	+0,009
60	,014	,012	,009	,007	,004	,002	,000	,002	,004	,006	,008
70	,013	,010	,008	,006	,004	,002	,000	,002	,004	,006	,007
80	,011	,009	,007	,005	,003	,001	,000	,002	,003	,005	,007
90	,010	,008	,006	,004	,003	,001	,000	,002	,003	,004	,006
700	-0,008	-0,007	-0,005	-0,004	-0,002	-0,001	0,000	+0,001	+0,003	+0,004	+0,005
10	,006	,005	,004	,003	,002	,001	,000	,001	,002	,003	,004
20	,005	,004	,003	,002	,001	-0,001	,000	,001	,002	,002	,003
30	,003	,003	,002	,002	,001	,000	0,000	+0,001	,001	,002	,002
40	-0,002	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	,000	,000	0,000	+0,001	+0,001	+0,001
750	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60	+0,001	+0,001	+0,001	+0,001	0,000	,000	,000	,000	,000	-0,001	-0,001
70	0,003	,002	,002	,001	+0,001	,000	,000	,000	-0,001	,001	,002
780	+0,004	+0,004	+0,003	+0,002	+0,001	+0,001	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003

Tafel 16 σ Argumente b = Barometerstand in mm, t = Lufttemperatur in Celsiusgraden

b	-20°	-15°	-10°	-5°	0°	+5°	+10°	+15°	+20°	+25°	+30°
mm											
600	-0,11	-0,13	-0,14	-0,16	-0,17	-0,19	-0,20	-0,22	-0,23	-0,24	-0,26
10	,09	,11	,13	,14	,16	,18	,19	,20	,22	,23	,24
20	,08	,10	,11	,13	,15	,16	,18	,19	,21	,22	,23
30	,06	,08	,10	,12	,13	,15	,16	,18	,19	,21	,22
40	,05	,07	,08	,10	,12	,13	,15	,17	,18	,19	,21
650	-0,03	-0,05	-0,07	-0,09	-0,11	-0,12	-0,14	-0,15	-0,17	-0,18	-0,19
60	-0,02	,04	,06	,07	,09	,11	,12	,14	,15	,17	,18
70	0,00	,02	,04	,06	,08	,09	,11	,13	,14	,16	,17
80	+0,01	-0,01	,03	,05	,06	,08	,10	,11	,13	,14	,16
90	,03	+0,01	-0,01	,03	,05	,07	,08	,10	,12	,13	,15
700	+0,04	+0,02	0,00	-0,02	-0,04	-0,05	-0,07	-0,09	-0,10	-0,12	-0,13
10	,06	,03	+0,01	0,00	,02	,04	,06	,07	,09	,11	,12
20	,07	,05	,03	+0,01	-0,01	,03	,04	,06	,08	,09	,11
30	,08	,06	,04	,02	0,00	-0,01	,03	,05	,06	,08	,10
40	,10	,08	,06	,04	+0,02	0,00	-0,02	,03	,05	,07	,08
750	+0,11	+0,09	+0,07	+0,05	+0,03	+0,01	0,00	-0,02	-0,04	-0,05	-0,07
60	,13	,11	,09	,07	,05	,03	+0,01	-0,01	,03	,04	,06
70	,14	,12	,10	,08	,06	,04	,02	0,00	-0,01	,03	,05
780	+0,16	+0,14	+0,11	+0,09	+0,07	+0,05	+0,04	+0,02	0,00	-0,02	-0,03

Ergänzung zu Bd II, Teil 2, S 495 ff Die internationale Polarsequenz

Die im Bande II, 2 dieses Handbuches mitgeteilten Größen der Sterne der internationalen Polarsequenz sind wie dort erwähnt den Mt Wilson Cont. 97 u 235 [Ap J 41, S 206 (1915) u 56, S 97 (1922)] entnommen Nach einer freundlichen Mitteilung von Prof F H SEAR'S halt er aber die in den Transactions Intern Astr Union 1, S 71 ff (1922) gegebenen Werte für sicherer Es seien daher in den folgenden Tabellen auch diese Größen wiedergegeben

Die Nordpolar-Sequenz

Zusatz-Sterne

Nr	P _g	P _v	C	Nr	P _g	P _v	C	Nr	P _g	P _v	C	Nr	P _g	P _v	C
	m	m	m		m	m	m		m	m	m		m	m	m
1s	2,55	2,08	0,47	28	15,31	14,54	0,77	125	14,77	14,37	0,40	401	14,51	13,70	0,81
1	4,40	4,37	0,03	12s	15,35	14,67	0,68	126	15,61	14,65	0,96	403	14,51	13,83	0,68
2	5,24	5,28	-0,04	13s	15,51	14,54	0,97	127	14,19	13,31	0,88	424	14,48	13,77	0,71
3	5,78	5,56	0,22	29	15,87	15,21	0,66	128	15,68	13,87	1,81	426	13,83	13,38	0,45
4	5,91	5,84	0,07	14s	16,02	15,05	0,97	130	15,03	14,21	0,82	427	13,21	12,05	1,16
5	6,46	6,45	0,01	30	16,19	15,44	0,75	134	14,23	13,54	0,69	439	14,72	13,49	1,23
2s	6,47	6,30	0,17	31	16,40	15,62	0,78	139	15,27	13,96	1,31				
3s	6,64	6,35	0,29	15s	16,57	15,71	0,86	142	14,46	13,71	0,75				
1r	6,69	5,09	1,60	32	16,75	15,58	1,17	146	14,26	13,56	0,70				
6	7,12	7,06	0,06	16s	16,86	15,50	1,36	151	13,71	12,66	1,05				
7	7,38	7,55	-0,17	33	17,06	15,97	1,09	152	14,55	13,76	0,79				
2r	7,93	6,32	1,61	17s	17,19	15,89	1,30	154	14,90	14,36	0,54				
8	8,32	8,13	0,19	34	17,24	16,29	0,95	158	15,17	14,57	0,60				
9	8,93	8,83	0,10	35	17,63	16,94	0,69	159	15,20	14,50	0,70				
3r	8,96	7,57	1,39	36	17,78	16,80	0,98	163	15,41	13,93	1,48				
10	9,11	9,06	0,05	18s	17,94	16,91	1,03	164	16,05	15,03	1,02				
4r	9,18	8,27	0,91	37	18,01	16,81	1,20	172	13,75	12,24	1,51				
11	9,77	9,56	0,21	19s	18,16	16,95	1,21	176	14,35	13,78	0,57				
12	10,08	9,77	0,31	38	18,20	17,05	1,15	188	16,28	15,27	1,01				
5r	10,16	8,63	1,53	39	18,58	17,13	1,45	202	16,12	15,41	0,71				
4s	10,31	9,83	0,48	20s	18,60	17,19	1,41	205	15,96	15,08	0,88				
13	10,52	10,37	0,15	21s	18,65	17,33	1,32	214	15,42	14,66	0,76				
6r	10,53	9,24	1,29	22s	18,75	17,13	1,62	215	15,43	13,69	1,74				
14	10,92	10,56	0,36	23s	18,70	17,41	1,29	218	15,46	14,11	1,35				
7r	10,96	9,87	1,09	40	18,87	17,29	1,58	226	14,90	14,15	0,75				
5s	11,07	10,06	1,01	24s	18,88	17,34	1,54	256	14,65	13,84	0,81				
15	11,27	10,88	0,39	25s	18,84	17,38	1,46	258	16,04	15,22	0,82				
6s	11,36	10,72	0,64	26s	18,89	—	—	277	15,34	14,56	0,78				
8r	11,44	10,46	0,98	41	19,02	17,47	1,55	283	14,87	13,50	1,37				
16	11,58	11,22	0,36	27s	19,08	17,43	1,65	286	15,97	14,96	1,01				
17	11,88	11,30	0,58	42	19,18	—	—	295	15,58	14,93	0,65				
9r	11,95	—	—	28s	19,23	—	—	297	15,84	14,79	1,05				
18	12,28	11,90	0,38	29s	19,28	—	—	301	16,24	15,57	0,67				
10r	12,61	12,03	0,58	30s	19,52	—	—	311	15,00	14,34	0,66				
7s	12,62	12,04	0,58	43	19,53	—	—	319	14,44	13,61	0,83				
19	12,68	12,24	0,44	31s	19,49	—	—	329	14,32	13,51	0,81				
20	12,98	12,52	0,46	32s	19,56	—	—	334	15,22	14,44	0,78				
11r	13,22	12,07	1,15	44	19,59	—	—	335	16,12	15,11	1,01				
21	13,34	12,49	0,85	33s	19,68	—	—	336	14,91	13,97	0,94				
22	13,46	12,84	0,62	34s	19,70	—	—	338	14,72	13,84	0,88				
23	13,59	13,00	0,59	45	19,80	—	—	341	15,16	14,02	1,14				
12r	13,78	12,47	1,31	35s	19,86	—	—	342	14,87	14,09	0,78				
24	13,92	13,31	0,61	36s	19,48	—	—	345	13,78	12,05	1,73				
25	14,10	13,58	0,52	37s	19,65	—	—	350	11,00	10,71	0,29				
8s	14,49	13,77	0,72	46	19,82	—	—	358	15,27	14,34	0,93				
26	14,61	13,69	0,92	38s	20,10	—	—	362	13,07	12,27	0,80				
9s	14,73	13,74	0,99					368	15,76	14,48	1,28				
27	14,89	14,25	0,64					378	14,11	12,81	1,30				
10s	15,28	14,52	0,76					389	13,56	12,90	0,66				
11s	15,30	14,35	0,95					391	14,56	13,83	0,73				

Sachverzeichnis.

- Abbild 115
 Abbildskopie 115
 Abbildung, rechtswendige 84
 ruckwendige 84
 Abbildungstiefe 115f
 Aberration, astronomische 60, 532
 chromatische 107
 Aberrationskonstante, spektrographische Be-
 stimmung der 394f
 Ablenkung, Minimum der 216
 durch einen Prismensatz 222
 Abweichung, sphärische 86, 104
 Hebung der 105, 124
 Achromatisches System 110
 Aktinische Korrektur 113
 Aktinometer 421
 ÄNGSTRÖMSCHE Einheit (ÅE, Å) 274
 internationale (IA) 278f
 Anhaltsterne, Anschluß an die 534ff
 Apochromat 112
 Astigmatismus 87, 126f, 224
 schiefer Bundel 101
 Astigmometer 191
 Auflösungsvermögen 118f
 theoretisches 120
 des Prismas 251f
 Aufpunkt 116
 Aufspaltungsfaktor 70
 Ausmessung photographischer Aufnahmen
 506f
 Autokollimation 184
 Axialität der Lichtmission 79

 BABINETSCHE Theorem 54
 BERGMANN-Serie 65
 Über- 66
 Beugung 47ff
 Beugungsbild eines Lichtpunktes 116f
 Biegung des Fernrohrs, systematische Fehler
 infolge der 342f
 Biegung des Spektrographen 315, 340ff
 Bild, aufrechtes 85
 höhenverkehrtes 84
 seitenverkehrtes 84
 spiegelverkehrtes 84
 umgekehrtes 85
 Bildebene, GAUSSISCHE 98
 Bilder, heteromorphe und orthomorphe 162
 Bildfeldebhnung, anastigmatische 101
 Bildfeldkrümmung 101
 Bildpunkt, reeller und virtueller 84
 Bimetallaktinometer 422
 blend 382
 Bolograph 432
 Bolometer 429ff
 Brachymedialfernrohr 176
 Brechungsdiagramm 215
 -exponent 82
 -index 215, 217f
 Brechungsquotient 82
 -winkel 215
 Brechzahl 82
 Brennebene 94
 Brennpunkt 92f
 Bestimmung des 206f
 Brennweite 87, 100
 Brennweite 93
 Messung der 207ff
 BREWSTERSche Streifen 45
 BREWSTERScher Winkel 3
 Bundel, astigmatisches 100
 Buschel, sagittales und tangentiales 87
 CALLENDAR regulator and recorder 330f
 Chromat von HARTMANN 317
 von SCHWARZSCHILD 317
 Chromatische Differenz der sphärischen Ab-
 weichung 114
 CORNU, Formel von 353ff
 CORNUSche Spirale 52
 Dachprisma 156, 158f
 Definition 123
 Definitionsvermögen 123
 Depolarisation 19
 Dialyt 140
 Differentialpyrheliometer 424
 Dioptrie 93
 Diploidoskop 156
 Dispersion 107, 231
 Grund- 110
 lineare 301
 Teil- 110
 Dispersionsdifferenzstreifen 42
 Dispersionsgebiet 263
 Doppelbrechung, akzidentelle 2
 Form- 16
 lamellare 16
 durch mechanische und thermische Ein-
 flüsse 13ff
 Platten- und Stäbchen- 16
 Stromungs- 16
 Doppelfernrohr 161
 DOPPLER-Effekt 59ff
 Drehimpuls (Spin) 71
 Druckverschiebung der Spektrallinien 277
 Du Bois-Effekt 55
 Dynamometer 211

 Ebner des punktuellen Feldes 101
 ECHELON-Spektroskop 257
 Einstell- und Haltefehler 344ff
 Einstellungsfehler beim Messen 352
 Eintrittswinkel 215
 Elastizitätscylipsoid 9
 Energieverteilung im Sonnenspektrum 435ff
 in Sternspektren, Messung mit Bolometer
 483ff
 mit Radiometer 486ff
 Erdfernrohr 157f

- Fadenbild- (Ghost-) Mikrometer 155
 Farbenabweichung 108ff, 123f
 Bestimmung der 203
 der sphärischen Abweichung 114
 Farbenlangsabweichung 107
 Farbseitenabweichung 108
 Farbenunterschied der Vergrößerung 108
 Farbenzerstreuung 107, 230ff
 Fernrohr 128ff
 astronomisches 135ff
 Auflösungsvermögen des 132f
 Erd- 157f
 Helligkeit des 129ff
 holländisches 159f
 Normalvergrößerung des 130
 Parallaxe im 154
 Prismen- 158f
 Richt- ohne Fadenkreuz 156
 terrestrisches 157f
 Vergrößerung des 128f
 Visierlinie des 154
 Zug- 157
 Fokusbestimmung beim Astrographen 504f
 FRAUNHOFERSche Beugungserscheinungen 50
 FRESNELSche Beugungserscheinungen 48f
 Zonen 48f
 FRESNELSches Ellipsoid 9
 Fundamentalsterne für Bestimmung von
 Radialgeschwindigkeiten 387f
 Geister 253ff
 LYMANSche 255f
 Gesamtablenkung 215
 Gesamtstrahlung der Fixsterne 466ff
 der Planeten 466ff
 der Sonne 420ff
 Gesichtsfeldblende 115
 Gitter, ebenes 237ff
 auflösende Kraft des 240
 Reflexions- 239
 Transmissions- 239
 Gitter, Konkav- 241ff
 Gitterkonstante 239
 Grenze, RAYLEIGHsche 118
 Große, bolometrische und radiometrische 410f
 Guiding error 344
 HAIDINGERSche Lupe 11, 21
 HARTMANNSche Formel 353ff
 Hauptebenen 94
 Hauptpunkte, negative und positive 92
 Hauptschnitt 82, 98
 Hauptstrahlen 85, 89
 Heizbandbolometer 421
 Helioskop 153f
 Helligkeit, bolometrische und radiometrische
 410f
 HELMHOLTZ, Satz von 90
 HERSCHELSche Streifen 33
 HERTZ-Effekt 55
 Hohlspiegel 163ff
 Indexellipsoid 9
 Instrumentalfehler bei Himmelsaufnahmen
 517ff, 538f
 Interferenzen bei punktförmiger Lichtquelle
 28ff
 Interferenzen dünner Blättchen 31f
 Interferenzphotometer von LUMMER 260
 Interferenzspektroskop von LUMMER-
 GEHRCKE 39
 Interferometer von MICHELSON 35f, 276f
 von PEROT-FABRY 40f, 260ff
 von TWYMAN 46, 187f
 Kampometer 500f
 Kanneliertes Spektrum 271
 Knotenpunkte, negative und positive 94
 Knotenpunktschlitten 184
 Koeffizienten, FRESNELSche 2
 Kohärenz 1, 27
 Koinzidenzen von Linien verschiedener
 Wellenlänge 241
 Koinzidenzmethode 264ff
 Kollimator 184, 299ff
 Koma 101ff, 126f
 Kombinationsterme 66
 Kompensationspyrheliometer 424f
 Konkavgitter 241ff
 Konvergenzverhältnis 90
 Korrespondenzprinzip 67
 Kugelgestaltsfehler 86
 Langsabweichung, sphärische 86
 LARMOR-Präzession 64
 Lenniskate von BUSCH 21
 Linien, abbildbare 101
 Linienidentifizierung 380ff
 Linienkrümmung 220ff, 234, 349ff
 LLOYDScher Versuch 28
 Lotstelle, aktive oder warme und inaktive
 oder kalte 409
 Luftdispersion, Einfluß der 269f
 Luftfernrohre 136
 Luke, Eintritts- und Austritts- 115
 LUMMER-Platte 259f
 LUMMER-GEHRCKE-Platte 259f
 Medialfernrohr 176
 Messerschneidenverfahren 199f
 Meterkerze 412
 Mikrometer von WELLMANN 13
 Multiplex-Interferenzspektroskop 42
 Normalenfläche 9
 Normallinie erster Ordnung 278
 Normallinien zweiter Ordnung (sekundäre)
 278f, 283ff
 des Eisenbogenspektrums 285f
 des Neon- und Kryptonspektrums 284,
 286f
 des Sonnenspektrums 287ff
 dritter Ordnung (tertiäre) 292f
 Normalvergrößerung des Fernrohrs 130
 Nutzeffekt des Objektivs 124
 Objektive, Absorption in 148
 Änderung in — durch Temperaturände-
 rungen 148
 astrophotographische 503f
 nach GAUSS 138
 nach FRAUNHOFER 137
 photographische 140ff
 für Spektrographen 143ff, 316ff
 Zentrierung 149

- Objektivprisma, Bestimmung der Radialgeschwindigkeiten mit dem 401ff
 Öffnungsblende 114
 Okulare 151ff
 Optische Einheit 57
 Leistung, Messung der 211ff
 Orthoskopie 100
 PASCHEN-BACK-Effekt 65, 73
 partieller 73
 Permanenzgesetze der g - und γ -Summen 74
 PETZVALsche Bedingung 105f
 Summe 106
 PFUNDBogen 283
 Phakometer 210
 Photometer von GEHLHOFF-SCHERING 26
 von NUTTING 26
 Photopolarimeter von CORNU 22
 Photozelle 416
 Plastik des Fernrohrs, spezifische 162
 totale 162
 Plattenneigung 519ff
 Pointierereinrichtung nach HUGGINS 332f
 Polarhelostat 178
 Polarisation, elliptische 5
 lineare 3
 partielle 3
 zirkulare 6
 bei Phosphoreszenz und Fluoreszenz 18
 Polarisationsebene 3
 -grad 3
 -photometer 25f
 -winkel von Gesteinen 24
 Polariskop 22f
 Poleffekt 279
 Präzession und Nutation 533
 Preferred solar constants 452f
 PRESTONSche Regel 65, 71
 Prisma 214ff
 geradsichtiges 218f
 Reversions- 88
 Wende- 88
 nach DELABORNE 88
 nach DOVE 13
 nach GROSSE 13
 nach NICOL 12
 nach ROCHON 13
 nach SÉNARMONT 13
 nach WOLLASTON 13
 Prismenfernrohr nach PORRO 158
 -kante 83
 Probeglasverfahren 205
 Prüfung des Fernrohrobjektives nach CHALMLERS und VAISALA 194f
 nach GARDENER und BENNET 195f
 nach HARTMANN 192f
 nach RONCHI 191f
 nach STREHL 201
 nach TWYMAN 187f
 nach WAETZMANN 189f
 nach WETTLAUER 197f
 nach YVON 201
 nach dem Messerschneidenvorverfahren 199f
 optischer Systeme 44
 Prüfung von Spiegeln 204f
 Punkt, ARAGOScher 30
 BABINETScher 20
 BREWSTERScher 20
 neutraler 19
 Pupille, Austritts- 115
 Eintritts- 115
 Purity 324
 Pyranometer 409, 443ff
 von ABBOT und ALDRICH 444f
 von A ÅNGSTRÖM 443
 Zuverlässigkeit der Messungen mit dem — 448f
 Pyranometrie, normale 448
 Pyrheliograph von DORNO-THILENIUS 421
 Pyrheliometer 409
 neueste Typen 493f
 von POUILLET 422
 Quantenzahl, azimutale 70
 innere 70
 Rumpf- 70
 Radialgeschwindigkeit, Berechnung der —
 des Mondes 393f
 eines Planeten 392f
 Bestimmung der 366ff
 mit dem Spektroskopkomparator 375ff
 Radialgeschwindigkeitsbestimmung, Fundamentalsterne für die 387f
 Reduktion auf die Sonne 388f
 Radialgeschwindigkeitskataloge, systematische Unterschiede der 385ff
 Radiometer 410
 -kraft 410
 -messungen von NICHOLS 467
 Radiomikrometer 409
 Randeffekt des ÅNGSTRÖMSchen Kompensationspyrheliometers 425
 RAYLEIGHsche Grenze 118
 Refraktion, photographische 522ff
 numerische Berechnung der 529ff
 Tafeln der 555ff
 Reinheit des Spektrums 324
 Restrefraktion 530
 Ricco, Gesetz von 131
 Rotationsbestimmung eines Planeten, spectrographische 396ff
 des Saturnringes 399ff
 ROWLANDScher Kreis 243f
 Abweichungen vom 245f
 ROWLANDSches Wellenlängensystem 275f
 Umrechnung aus dem — in das internationale 294f
 RUNGESche Regel 68
 RYDBERG-SCHUSTERSche Regel 65
 SAUNDERS-Koppelung 71
 Schlieren 145
 SCHUSIER, Formel von 304, 324f
 Schwingungsebene 3
 Sehen, direktes und indirektes 136
 SEIDELS Theorie der Bildfehler 98ff
 Seitenabweichung, sphärische 104
 Selected Pyrheliometry 450
 Selenphotometer 414ff

- Selenzelle 413ff
 spektrale Empfindlichkeit der 415
 Sensibilisatoren für Rot und Infrarot 416ff
 Siderostat 179
 Silver-Disk-Pyrheliometer von ABBOT 422f
 Sinusbedingung von ABBE 104
 Skalenwert, Orientierung und Nullpunkts-
 fehler 517f
 Smithsonian Revised Scale 428
 Solarimeter 421
 Solarkonstante, Ableitung der, kurzes Ver-
 fahren 446ff
 langes Verfahren 439ff
 Verbesserung definitiver Werte der 450ff
 Sonnenflecke, Strahlung der 453ff
 Sonnenkorona, Messungen mit dem Bolo-
 meter und der Thermoauale 456ff
 Sonnenparallaxe, spektrographische Bestim-
 mung der 394f
 Sonnenstrahlung, ultraviolette, Messung der
 460ff
 Spaltblende 319ff
 Spektrobolometer von LANGLEY 431f
 von WILSING 432ff
 Spektrograph, Gitter- nach MERRILL und
 NICHOLS 315
 nach PLASKETT 310ff
 nach WRIGHT 307ff
 Spektrographen, falscher Fokus des 338f
 — objektive 143ff, 300f, 316f
 optische Mangel des 336ff
 Temperaturempfindlichkeit des 339ff
 Spektrokomparator von HARTMANN 371ff
 Spektrum, kanneliertes 33
 Kurve des — mter Ordnung 236
 sekundares 110f
 Spiegelfernrohre, katadioptrische 175
 katoptrische 175
 -prismen 87f
 -teleskope 171ff
 Spin (Drehimpuls) 71
 STAMPFFERSches Gitter 185
 Standard, primary 275
 STARK-Effekt 76ff
 Stufengitter 43, 257ff
 Substanzen, negative und positive 7
 System, achromatisches 110
 astigmatisch korrigiertes 101
 ausgerichtetes 89
 farbenfreies 110
 punktuell abbildendes 101
 sammelndes 95
 teleskopisches, afokales 97
 zentriertes 89
 zerstreuendes 95
 TALBOTSche Streifen 53
 Tangentialkoordinaten 507f
 Beziehungen zwischen zwei Systemen von
 508ff
 Transformation der — in AR und Dekl
 511ff
 Hilfstafeln 541ff
 Technische Konstante 201f
- Teleobjektiv 143
 Telestereoskop 161
 Tenth metre 274
 Thalofidezelle 415
 Thermoelement 409
 von COBLENTZ 470f
 von HASE 498
 von MOLL 497
 von C MÜLLER 499
 von PETTIT und NICHOLSON 475f
 von PFUND 468f
 Thermostat von HARTMANN 327f
 von PLASKETT 330f
 Totalreflexion, Grenzwinkel der 83
 Tourniquet 184
 Tower telescope 180
 Trennungskoeffizient 202
 -vernogen, geometrisches 202
 Tripelprisma 85
 Turmfernrohr 180
 Überkorrektur, sphärische 104
 Überverbesserung 86
 Umkehrprisma 159
 Unterkorrektur, sphärische 104
 Unterverbesserung 86
 Vergrößerung, angulare 92
 axiale 92
 laterale 90
 nützliche 132
 Tiefen- 92
 Winkel- 90
 Vergrößerungsdifferenz, chromatische 108
 Verzeichnung 99
 kissenförmige 86
 tonnenförmige 86
 Verzeichnungsfreiheit 100
 Warmindex (W I) 412
 Wasserzellenabsorption (W Z A) 412
 Water-Flow-Pyrheliometer 426f
 von TINGWALD 495ff
 verbessertes 494
 Water-Stir-Pyrheliometer 427f
 Welle, homogene 27
 Wellenlängensysteme 273ff
 Fehler der 380
 Geschichte der 273f
 ROWLANDS 275f
 Winkel, brechender 83
 Winkelvergrößerung 226
 ZEEMAN-Effekt 63ff
 an Bandenspektren 74
 Normalisierung des 73
 π - und σ -Komponente 64
 im Spektrum der Sonnenflecke 75f
 Zentralspiegel 85
 Zerstreuung des Lichtes 18
 Zoelostat 180
 Zone 105
 Zonenfehler 105
 Zwischenfehler 105

